

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Б. В. ГУСЕВ, В. Г. ЗАЗИМКО,
доктора технических наук

ВИБРАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА

Київ «Будвеєльник» 1991

ББК 38.626.1
Г96

УДК 666.97.033.16

Рецензент И. Г. Селиванов
Редакция литературы по архитектуре,
проектированию,
строительным материалам и конструкциям
Зав. редакцией А. А. Петрова
Редактор В. А. Шевчук

Гусев Б. В., Зазимко В. Г.
Г96 Вибрационная технология бетона.—
К. 1 / Будівельник, 1991.— 160 с.: ил.
ISBN 5-7705-0134-0.

В книге рассмотрены эффективные низкочастотные управляемые режимы уплотнения тяжелых и легких бетонных смесей. Даны практические рекомендации по их выбору. Приведены технические характеристики большинства применяемых на предприятиях строительной промышленности машин и станков, а также нового оборудования.

Для специалистов проектных и строительных организаций.

Г 3306000000-086
М203(04)-91 19-91

ББК 38.626.1

ISBN 5-7705-0134-0 © Гусев Б. В., Зазимко В. Г., 1991

Посвящается
светлой памяти
внука Зазимко Толи

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основной вид формовочного оборудования в строительстве — вибрационное.

Вибрацию для уплотнения бетонных смесей начали применять в начале 30-х годов во Франции: патент на первый вибратор с гармоническими колебаниями получил в 1927 г. Денян.

В СССР первые обобщения работ по уплотнению бетонных смесей сделаны в конце 30-х годов [13, 19]. Большая заслуга в развитии вибрационной технологии у нас в стране принадлежит Д. Д. Баркану, А. Е. Десову, О. А. Савинову, В. Н. Шмигальскому и другим ученым [3, 9, 10, 23, 29, 30], исследования которых в основном посвящены гармоническим колебаниям в использовании средних и высоких частот (50 Гц и выше).

В 70-х годах работами Б. В. Гусева и других исследователей положено начало новому низкочастотному уплотнению бетонных смесей (25 Гц и ниже) [7, 8]. В 80-е годы в продолжение работ по низкочастотному уплотнению защищены докторские диссертации А. А. Афанасьевым, В. Г. За-

зимко, К. А. Олехновичем [1, 12, 18]. В настоящей книге обобщены результаты работ докторов технических наук Б. В. Гусева, В. Г. Зазимко и их учеников: кандидатов техн. наук Б. А. Осипова, Ю. М. Зайца, А. Н. Пшинько, М. Болтрыка, Н. И. Орды, А. С. Петрова, Е. А. Синевой, К. В. Черных, А. Ф. Масляева, Т. Е. Грибковой и И. Е. Холмина.

В науке о бетоне в настоящее время много внимания уделяется рассмотрению его свойств как композиционного материала, развиваются направления о свойствах искусственных строительных конгломератов (ИСК). Эти вопросы о свойствах материалов особенно интересны в связи с полидисперсной структурой бетона. В первой главе этому вопросу посвящен специальный раздел. Однако свойства материала должны быть органично связаны с технологией его получения. Авторами в качестве комплексной характеристики принята удельная прочность бетона (отношение предела прочности к расходу цемента), позволяющая оценивать и сравнивать различные виды технологий между собой.

В развитии вибрационной технологии наметились две тенденции, связанные с применением подвижных и весьма подвижных бетонных смесей.

При использовании подвижных смесей особенно важно устранить расслаиваемость. Авторами показана эффективность низкочастотных симмет-

ричных режимов, снижающих расслаиваемость в 2...2,5 раза, а также возможность эффективно использования добавок пластификаторов и низкочастотных режимов для получения значительного эффекта по снижению расхода цемента, уменьшению уровня шума и вибрации при сокращении режима уплотнения до 10...20 с.

Вторая тенденция в изучении и использовании сборного железобетона как у нас в стране, так и за рубежом связана с применением жестких и сверхжестких смесей в целях обеспечения немедленной распалубки изделий (плит пустотного настила, стеновых блоков и дорожных изделий). При этом в 5...10 раз снижается металлоемкость оборудования и значительно уменьшается расход цемента. Для уплотнения жестких смесей предложены эффективные низкочастотные ударно-вибрационные режимы с частотой 15...30 Гц.

В технологии бетона весьма важны также представления об удобоукладываемости, определяющей формуемость смеси и позволяющей установить предел в получении материала заданных технических свойств для каждой конкретной технологии. Удобоукладываемость зависит от состава и, прежде всего, — от количества воды и сочетания мелко- и крупнодисперсной составляющих. В понятие формуемости заложено представление об полидисперсных системах, в основном двухкомпозиционных «крупный заполнитель — растворная часть». Конечно, это упро-

щенное представление, однако оно позволило обосновать двухстадийность процесса и привело к упрощенной схеме регулирования управлением вибрационным уплотнением. На новом этапе это связано с созданием двухчастотных режимов колебаний и вибрационного оборудования с управляемыми параметрами. Таким образом, с новых позиций сформулированы основные физические представления о процессе вибрационного уплотнения, полезные как технологам, так и конструкторам — создателям вибрационного оборудования.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ

1.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

В зависимости от плотности бетоны делят на легкие ($\rho = 600 \dots 1200 \text{ кг/м}^3$), облегченные ($\rho = 1200 \dots 1800 \text{ кг/м}^3$) и тяжелые ($\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$). На плотность в основном влияет вид заполнителей. Особолегкие бетоны плотностью 600...900 кг/м^3 , как правило, бывают ячеистыми или имеют в составе крупный заполнитель органического происхождения; легкие, плотностью выше 900 кг/м^3 , изготавливают с использованием в качестве крупного заполнителя в основном керамзитового гравия. В связи с тем что плотность заполнителя (в куске) ниже или выше плотности растворной составляющей (цемент + песок + вода), в процессе уплотнения возможно расслоение смеси.

Как правило, бетон имеет плавающую структуру заполнителей, частицы которых раздвинуты растворной составляющей, выполняющей роль матрицы (рис. 1.1). Коэффициент раздвижки, который может быть в 1,1...1,5 раз больше значения пустотности крупного заполнителя, принято определять по формуле

$$P_{у.щ} = \frac{\rho_{и.щ} - \rho_{н.щ}}{\rho_{и.щ}} \cdot 100 \%,$$

где $P_{у.щ}$ — пустотность щебня; $\rho_{и.щ}$, $\rho_{н.щ}$ — плотность щебня соответственно истинная и насыпная.

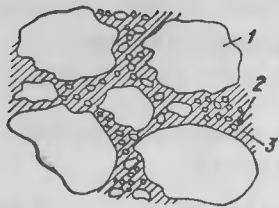


Рис. 1.1. Макроструктура бетона:

1 — крупный заполнитель (щебень); 2 — мелкий заполнитель (песок); 3 — цементный камень

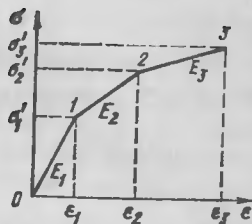


Рис. 1.2. Характер зависимости между напряжениями и деформациями в расчетной модели прочности бетона

Аналогично при раздвижке зерен песка будет образована пленка цементного теста. Ее толщина во многом определяет как физико-механические свойства бетона, так и технологические свойства бетонной смеси.

В данном случае бетон рассматривается как композиционный материал на макро- и микроуровнях. На макроуровне бетон состоит из зерен крупного заполнителя (включений) и расщепленной составляющей (матрицы). Вследствие различий в упругих характеристиках включений и матрицы в нем возникает сложное напряженное состояние и появляются как растягивающие, так и сжимающие напряжения [6].

Детальное исследование напряженно-деформированного состояния позволяет рекомендовать оптимальную структуру бетона, в которой максимально возможно устраняется концентрация напряжений и наиболее полно выявляются прочностные свойства составляющих.

Для определения напряженно-деформированного состояния бетонов авторами используется один из численных методов теории упругости —

метод конечных элементов, предусматривающий разбишку расчетной области на любое конечное число элементов различных размеров простой геометрической формы, например, треугольной. При разбишке выделяется конечное число узловых точек — как правило, вершин треугольных элементов. В пределах каждого из них материал предполагается сплошным, однородным, изотропным, упругим, имеющим линейную зависимость между перемещениями, деформациями и напряжениями.

На основе метода конечных элементов авторы разработали упрощенную методику учета итерационным методом нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями (рис. 1.2). Первоначально в расчетах элементам, принадлежащим данному компоненту, задают модуль упругости E_1 . После полного выполнения расчета, если в одном элементе (или нескольких) напряжения или деформации превысили соответствующие значения σ_1 или ϵ_1 , этому элементу (элементам) дополнительно задают соответствующее новое значение модуля упругости. Постепенно увеличивают внешнюю нагрузку и после каждого расчета анализируют напряженно-деформированное состояние модели. Если в элементе, которому ранее было присвоено значение модуля упругости, соответствующее E_2 , возникли напряжения или деформации больше соответственно σ_2 или ϵ_2 , то ему присваивают новое значение модуля упругости E_3 , близкое к 0, т. е. предполагают, что произошло разрушение и элемент практически выводят из работы. Принятая методика позволяет проследить за изменением напряженно-деформированного состояния образца вплоть до полного разрушения.

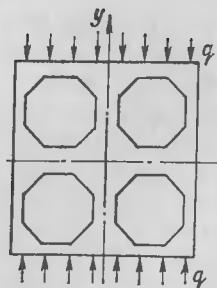


Рис. 1.3. Расчетная модель прочности бетона

Этим методом решены задачи по определению влияния соотношения модулей упругости, объемов, формы включений и матрицы на напряженно-деформированное состояние и предел прочности бетона (рис. 1.3). В расчетах соотношение модулей упругости включения E_v и матрицы

E_m принято для бетонов соответственно легких и тяжелых: $E_v/E_m = 0,5 \dots 0,9$ и $E_v/E_m = 2 \dots 4$. Соотношение объемов включений к общему объему изменялось от 0,35 до 0,45. Форма включений принималась круглой, многогранной и прямоугольной с различной ориентацией углов по отношению к направлению действия внешней нагрузки. Расчеты выполнены на ЭВМ М-220 по специально составленной программе, позволяющей определять напряженно-деформированное состояние плоских моделей при детальной разбивке рассматриваемой области на элементы с выделением до 1000 узловых точек.

Из изученных в названных пределах факторов структуры наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние и предел прочности бетонов оказывает изменение соотношения модулей упругости в заполнителе и растворной составляющей. При интенсивности внешней нагрузки $q = 10$ МПа пунктирными линиями на рис. 1.4 обозначены границы полей с равными напряжениями σ_x и σ_y для $1/4$ модели. Если соотношение модулей упругости включения и матрицы больше единицы, характер поля напряжений аналогичен

представленному на рис. 1.4а, меньше единицы — на рис. 1.4б. С изменением соотношения модулей упругости изменяется концентрация напряжений только по абсолютному значению.

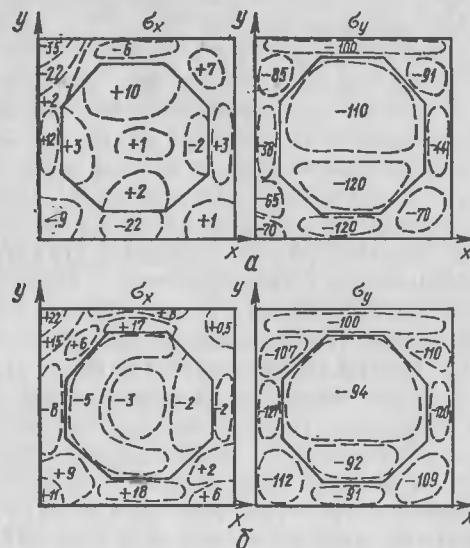


Рис. 1.4. Напряженное состояние в бетоне (сжимающие напряжения показаны со знаком минус «-», растягивающие — плюс «+») при:

$$a - E_v/E_m = 3; \quad б - E_v/E_m = 0,7$$

Особый интерес представляет концентрация растягивающих напряжений, так как у бетонов и их составляющих предел прочности при растяжении, как правило, в несколько раз ниже, чем при сжатии.

Анализ представленных на рис. 1.5 зависимостей показывает, что на увеличение концентрации растягивающих напряжений наиболее существ-

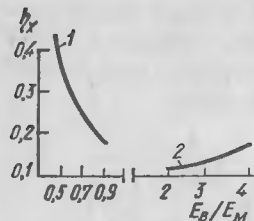


Рис. 1.5. Влияние соотношения упругих характеристик включения и матрицы на концентрацию растягивающих напряжений:

1, 2 — области для бетонов соответственно легких и тяжелых

венно влияет изменение соотношения модулей упругости включения и матрицы от 0,9 до 0,5. При этом максимальные растягивающие напряжения σ увеличиваются более чем в 2 раза.

В результате расчета моделей определены основные закономерности создания структуры с максимальным использованием прочностных свойств составляющих. Для тяжелых бетонов рациональны составы с соотношением модулей упругости включения и матрицы от 2 до 3. При большем соотношении концентрация наиболее опасных растягивающих напряжений значительно увеличивается. Нецелесообразны заполнители типа керамзита, модуль упругости которых составляет менее 0,7 модуля упругости растворной составляющей, так как при этом существенно увеличивается концентрация растягивающих напряжений. Объемная концентрация и форма составляющих незначительно влияют на напряженно-деформированное состояние и предел прочности бетона, поэтому их можно назначать в зависимости от экономической целесообразности.

При изучении напряженно-деформированного состояния на микроуровне толщину пленки цементного камня варьировали от 0,01 до 0,05 мм. В пленке был предусмотрен различный характер расположения пор с их равномерным распределением и расположением в контактной зоне [12].

Значения модуля деформации цементного камня изменяли от 1,4 до $2,6 \cdot 10^4$ МПа. Начальное трещинообразование в цементном камне с толщиной пленки 0,05 мм происходит при нагрузках в 2 раза меньших, чем при толщине 0,01 мм. Характер поровой структуры цементного камня также примерно в 2 раза изменяет уровень концентрации растягивающих напряжений. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости стремления к минимальным толщинам пленок и созданию пор минимальных размеров в ее структуре. В этом случае бездефектность будет определяться минимальным водоцементным отношением, так как для гидратации цемента требуется всего $\approx 15\%$ воды, т. е. $В/Ц = 0,15$.

В связи с существенным влиянием толщины и качества цементной пленки на основные свойства песчаного бетона авторы оценивали ее влияние на прочность, морозостойкость и другие технические свойства бетона. Качество определяли содержанием в цементном тесте воды, а в цементном камне — пор. Чтобы на свойства не повлияло уплотнение, в бетон вводили 0,5 % суперпластификатора С-3 (в расчете на сухое вещество добавки от массы цемента). В результате была разработана методика расчета удельной поверхности заполнителя и толщины пленки цементного теста.

Максимальный размер (диаметр) песчинок i -й фракции принят $d_{\max}$, минимальный — $d_{\min}$. Например, для остатка на сите 0,315 $d_{\max} = 0,63$ мм, $d_{\min} = 0,315$ мм.

Общая поверхность песчинок i -й фракции, масса которой составляет m_i ,

$$S_{\text{общ}}^i = S_{\text{ср.}} n_i, \quad (1.1)$$

где $S_{\text{ср.з}}$ — средняя поверхность одного зерна;
 n — число зерен в массе m_i ;

$$S_{\text{ср.з}} = \frac{S_{\text{max}} + S_{\text{min}}}{2} = \frac{\pi}{2} (d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2) = \pi d_{\text{ср.}}^2. \quad (1.2)$$

Здесь S_{max} , S_{min} — поверхность зерна размеров соответственно максимального и минимального.

Из формулы (1.2)

$$d_{\text{ср.}} = \sqrt{\frac{d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2}{2}} = \left(\frac{d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2}{2} \right)^{1/2}. \quad (1.3)$$

Число зерен в массе n представим так:

$$n = \frac{V_{\text{общ}i}}{V_{\text{ср.з}}}, \quad (1.4)$$

где $V_{\text{общ}i}$ — общий объем зерен i -й фракции,

$$V_{\text{общ}i} = m_i / \rho, \quad (1.5)$$

ρ — плотность песка;

$$V_{\text{ср.з}} = \frac{\pi d_{\text{ср.}}^3}{6} = \frac{\pi}{6} \left(\frac{d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2}{2} \right)^{3/2}. \quad (1.6)$$

После подстановки формул (1.5) и (1.6) в выражение (1.4) получаем

$$n = \frac{m_i \cdot 6 \cdot 2^{3/2}}{\rho \pi (d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2)^{3/2}} = \frac{12 \sqrt{2} m_i}{\pi \rho (d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2)^{3/2}}. \quad (1.7)$$

Затем формулы (1.7) и (1.2) подставляем в (1.1):

$$S'_{\text{общ}} = \frac{\pi}{2} (d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2) \frac{12 \sqrt{2} m_i}{\pi \rho (d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2)^{3/2}},$$

отсюда

$$S'_{\text{общ}} = \frac{6 \sqrt{2} m_i}{\rho \sqrt{d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2}}. \quad (1.8)$$

Для расчета удельной поверхности зерен i -й фракции выражение имеет следующий вид:

$$S'_{\text{уд}} = \frac{S'_{\text{общ}}}{m_i} = \frac{6 \sqrt{2}}{\rho \sqrt{d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2}}. \quad (1.9)$$

Для частного случая, когда $d_{\text{max}} = d_{\text{min}}$, формула (1.9) преобразуется:

$$S'_{\text{уд}}^{d=\text{const}} = \frac{6 \sqrt{2}}{\rho \sqrt{d^2 + d^2}} = \frac{6}{\rho d}. \quad (1.10)$$

При среднем значении плотности песка $\rho = 2610 \text{ кг/м}^3$ $\frac{6 \cdot \sqrt{2}}{\rho} = 3,25 \cdot 10^{-3}$, а $\frac{6}{d} = 2,3 \times 10^{-3}$ выражения (1.9) и (1.10) запишем так:

$$S'_{\text{уд}} = \frac{3,25 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_{\text{max}}^2 + d_{\text{min}}^2}}; \quad (1.11)$$

$$S'_{\text{уд}}^{d=\text{const}} = \frac{2,3 \cdot 10^{-3}}{d}. \quad (1.12)$$

Толщину пленки цементного теста при i -й фракции песка определяем для 1 м³ бетона по формуле

$$\delta = \frac{V_{\text{ц.т}} - V_{\text{м.п}}}{S'_{\text{уд}} \Pi}. \quad (1.13)$$

Здесь $V_{\text{ц.т}}$ — общий объем цементного теста, м³; $V_{\text{м.п}}$ — объем межзерновых пустот, м³; Π — расход песка, кг; $S'_{\text{уд}}$ — удельная поверхность i -й фракции цемента, м²/кг;

$$V_{\text{ц.т}} = \frac{Ц}{\rho_{\text{ц}}} + B, \quad (1.14)$$

где Π — расход цемента, кг; B — расход воды, m^3 ; ρ_{Π} — плотность цемента, kg/m^3 ;

$$V_{м.п} = \frac{\Pi_{п.у} \Pi}{\rho_{п.у}}, \quad (1.15)$$

где $\Pi_{п.у}$ — пустотность песка в уплотненном состоянии; $\rho_{п.у}$ — насыпная масса песка в уплотненном состоянии, kg/m^3 .

Окончательное выражение для определения толщины пленки выглядит так:

$$\delta = \frac{\left(\frac{\Pi}{\rho_{\Pi}} + B \right) - \Pi_{п.у} \frac{\Pi}{\rho_{п.у}}}{S_{уд}^i \Pi}. \quad (1.16)$$

Пример. Приведем расчет толщины пленки для образца № 1 (табл. 1.1). Так как расчет производился на $1 m^3$ песчаного бетона, то в формуле (1.16) расход песка Π численно равен значению $\rho_{п.у}$. Пустотность песка $\Pi_{п.у} = 0,35 m^3$, $\rho_{п.у} = 1700 kg/m^3$, $\Pi = 350 kg$. Тогда толщина пленки цементного теста

$$\delta = \frac{\left(\frac{350 kg}{3100 kg/m^3} + 0,256 m^3 \right) - 0,35 m^3}{11,4 m^2/kg \cdot 1700} = 0,1 \cdot 10^{-5} m.$$

Удельная поверхность для рядового песка $S_{уд}^i = 11,4 m^2/kg$.

Толщина пленки цементного теста (камня), получаемая по приведенному расчету, равна размеру зерна цемента (единицы или десятки микрон) и согласуется с толщиной пленки, приводимой И. Н. Ахвердовым [2]

Т а б л и ц а 1.1. Составы образцов-призм из песчаного бетона (масса $1 m^3$ песка = 1700 кг)

Номер образ- ца	$\delta \cdot 10^4, \text{ м}$	Расход			Номер образ- ца	$\delta \cdot 10^4, \text{ м}$	Расход		
		$\Pi, \text{ кг}$	$B, \text{ л}$	$C-3,$			$\Pi, \text{ кг}$	$B, \text{ л}$	$C-3, \text{ г}$
При $(B/\Pi)_{\text{нст}} = 0,15$									
1	0,1	350	256	1,8	16	0,1	290	277	1,5
2	0,3	430	268	2,2	17	0,3	355	293	1,8
3	0,5	515	280	2,6	18	0,5	425	310	2,1
4	0,7	595	292	3,0	19	0,7	490	327	2,5
5	0,9	680	305	3,4	20	0,9	560	344	2,8
6	1,1	700	317	3,8	21	1,1	625	360	3,1
7	1,3	840	329	4,2	22	1,3	695	378	3,5
8	1,5	925	342	4,6	23	1,5	760	394	3,8
9	1,7	1010	355	5,1	24	1,7	830	412	4,2
10	2,0	1135	373	5,7	25	2,0	935	438	4,7
11	2,5	1335	403	6,7	26	2,5	1100	479	5,5
12	3,0	1540	434	7,7	27	3,0	1270	522	6,4
13	4,0	1950	496	9,8	28	4,0	1610	607	8,1
14	5,0	2355	556	11,8	29	5,0	1950	692	9,8
15	6,0	2770	619	13,9	30	6,0	2290	777	11,5
При $B/\Pi = 0,25$									

Расчет истинного водоцементного отношения выполнен на примере [12]:

$$(B/\Pi)_{ист} = (B/\Pi)_{нач} - B_n (\Pi/\Pi),$$

где $(B/\Pi)_{нач}$ — начальное водоцементное отношение, определяемое расчетами на прочность; B_n — водопогребность песка (в данном случае составляет 0,09, т. е. 9 %).

Изготовлено две партии образцов призм размерами $4 \times 4 \times 16$ по 15 в каждой. Толщина пленки изменялась дискретно через 0,2...1. У первой партии истинное водоцементное отношение принято равным 0,15, у второй — 0,25.

Для каждого образца изготовили по три образца-близнеца. В 28-суточном возрасте их выдержали в воде 48 ч, определили водопоглощение и начальную скорость ультразвука, затем один из них оставили для контроля, два остальных испытали на морозостойкость при температуре -50°C . Скорость ультразвука измеряли вдоль призм через 5...10 циклов как образцов, проходивших испытание на морозостойкость, так и контрольных, хранящихся в воде.

Из результатов оказалась очевидной разница в качестве пленки: более плотная при $(В/Ц)_{\text{нст}} = 0,15$ (скорость ультразвука от 3000 м/с при $\delta = 0,1 \cdot 10^{-5}$ м до 4000 м/с при $\delta = 6,0 \cdot 10^{-5}$ м; менее плотная при $(В/Ц)_{\text{нст}} = 0,25$ (скорость ультразвука — от 2500 м/с для $\delta = 0,1 \cdot 10^{-5}$ м до 3900 м/с при $\delta = 6 \cdot 10^{-5}$ м). Причем, скорость, равная 3700 м/с, справедлива для призм с толщиной пленки $\delta = 0,5 \cdot 10^{-5}$ м при $(В/Ц)_{\text{нст}} = 0,15$. При $В/Ц_{\text{нст}} = 0,25$ эта скорость наблюдается у призм с более толстой пленкой $\delta = (1,3...2,0) \cdot 10^{-5}$ м. Изменения скорости ультразвука определены для одних и тех же образцов, прозвученных до и после испытания. Для установления прочности использовали результаты испытаний образцов, проверенных на морозостойкость, и контрольных.

Пленка цементного камня должна быть оптимальной как по толщине, так и по качеству, т. е. поровой структуре, от которых и зависит долговечность конгломерата, что показано при большом количестве циклов морозостойкости при -50°C . Как следует из рис. 1.6, рациональные толщины пленок составляют $(1,5...3,5) \cdot 10^{-5}$ м ($0,015...0,035$ мм). Толщина пленки определяет

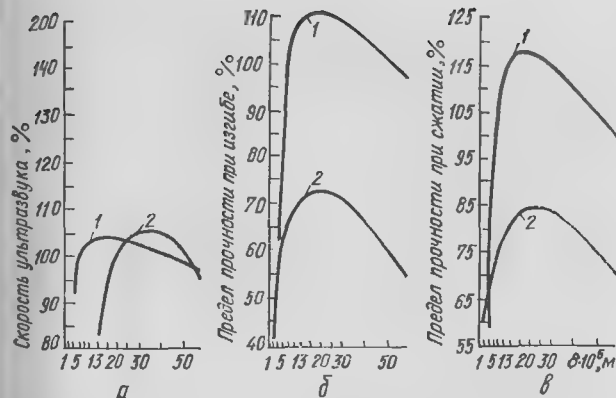


Рис. 1.6. Зависимость механических свойств песчаного бетона после 70 циклов испытаний от толщины пленки цементного камня:

1 — при $(В/Ц)_{\text{нст}} = 0,15$; 2 — при $(В/Ц)_{\text{нст}} = 0,25$

не только технические, но и технологические свойства бетонных смесей.

В общем виде существует оптимальная толщина пленки, обеспечивающая максимальную прочность при рациональной вязкости для различных значений $В/Ц$. В табл. 1.2, где представлены составы при $В/Ц = 0,65$, средних расходах песка ($600...900 \text{ кг/м}^3$) и щебня ($1100...1300 \text{ кг/м}^3$), рациональные толщины пленок $(2,0...3,0) \times 10^{-5}$ м обеспечивают жесткость 20...30 с по техническому вискозиметру.

В работах Н. П. Блещина, В. Д. Коюшева и других ученых [4] рассматривается зависимость подвижности бетонной смеси от характеристик состава. Такой подход, безусловно, правомерен и выражается в виде соотношений составляющих. Для оценки технологических свойств бетонной

Таблица 1.2. Составы и технологические свойства бетонных смесей

Расход на 1 м³ бетона				α	β · 10⁻³, м	В/Ц _{нест}	Ж, с (стандартная)
Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг				
250	162	696	1315	1,1	1,22	0,19	117
250	162	801	1210	1,3	0,82	0,17	143
250	162	901	1110	1,5	0,52	0,15	113
275	179	630	1315	1,1	1,89	0,25	56
275	179	735	1210	1,3	1,36	0,23	86
275	179	835	1110	1,5	0,97	0,22	70
300	195	567	1315	1,1	2,67	0,30	35
300	195	671	1210	1,3	1,97	0,29	32
300	195	771	1110	1,5	1,48	0,27	41

смеси В. Д. Коюшев использует безразмерные характеристики:

а) показатели раздвижки песка цементным тестом Z_{1x} и щебня раствором Z_{2x} :

$$Z_{1x} = \frac{V_T}{V_P \Pi_{п.у}} \text{ и } Z_{2x} = \frac{V_P}{V_6 \Pi_{щ.у}}; \quad (1.17)$$

б) инварианты подобия цементного теста X_1 , раствора X_2 и бетонной смеси X_3 :

$$X_1 = \frac{B/V_T}{(B/V_T)_0}, \quad X_2 = \frac{Z_{1x}}{Z_1}, \quad X_3 = \frac{Z_{2x}}{Z_2}, \quad (1.18)$$

где B , V_T , V_P , V_6 — объемы воды, цементного теста, раствора и бетонной смеси, л; Z_1 , Z_2 — показатели раздвижки частиц песка и щебня в смесях удобоукладываемостью по осадке конуса 8 см; $(B/V_T)_0$ — объемная концентрация воды в цементном тесте нормальной густоты; $\Pi_{п.у}$, $\Pi_{щ.у}$ — стандартная пустотность песка и щебня в уплотненном состоянии.

На рис. 1.7, 1.8 представлены зависимости осадок конуса и жесткостей по техническому

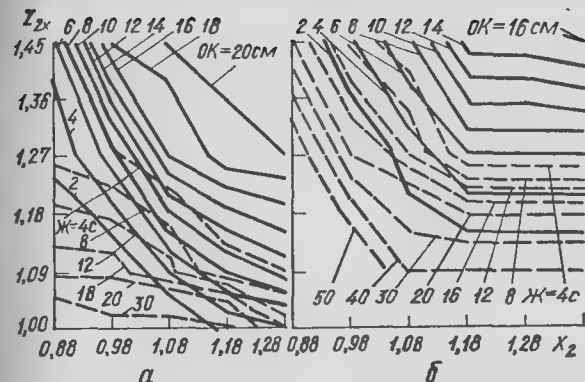


Рис. 1.7. Графики равных значений осадок конуса, см (сплошные линии), и жесткостей, с (пунктирные линии), бетонных смесей для щебня фракций 5...20 мм при $X_1 = 1,3$:

а — гранитный заполнитель; б — известняковый заполнитель

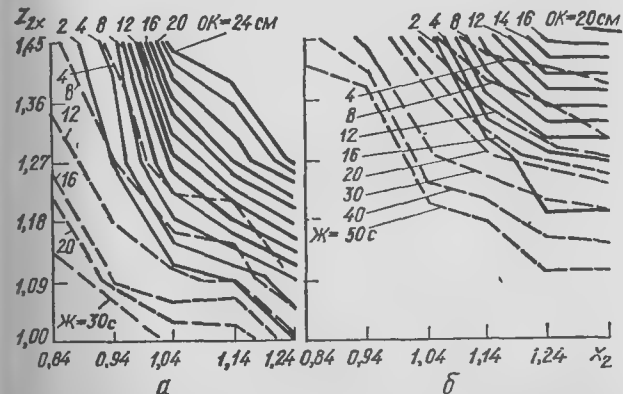


Рис. 1.8. Графики равных значений осадок конуса, см (сплошные линии), и жесткостей, с (пунктирные линии), бетонных смесей для щебня фракции 5...20 мм при $X_1 = 1,5$:

а — гранитный заполнитель; б — известняковый заполнитель

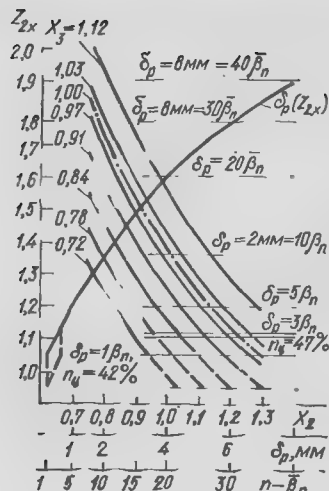


Рис. 1.9. Комплексная зависимость технологических свойств от состава бетонных смесей

вискозиметру для различных составов бетонных смесей. Исходя из характеристик состава бетонных смесей рекомендуется пользоваться комплексными структурно-реологическими кривыми (рис. 1.9) для восьми зон подвижности: при $X_3 < 0,72$ — смеси особо жесткие ($X_3 > 90$ с); $X_3 =$

$= 0,72...0,73$ — повышено жесткие ($X_3 = 90...50$ с); $X_3 = 0,78...0,84$ — ($X_3 = 50...30$ с), $X_3 = 0,84...0,91$ — умеренно-жесткие ($X_3 = 30...16$ с, $OK \leq 2$ см); $X_3 = 0,91...0,97$ — малоподвижные ($OK = 2...6$ см); $X_3 = 0,97...1,03$ — умеренно-подвижные ($OK = 6...10$ см); $X_3 = 1,03...1,12$ — подвижные ($OK = 10...16$ см) и $X_3 > 1,12$ — литые ($OK > 16$ см).

Толщина пленки растворной составляющей взаимосвязана с усредненным размером мелкого β_n и крупного $\beta_{ш}$ заполнителей и определяет удобоукладываемость бетонной смеси.

Статистически наиболее вероятный размер частиц портландцемента с удельной поверхностью $2820 \text{ см}^2/\text{г}$ и с зерновым составом, разделенным на шесть фракций крупностью от 2,5 до 100 мкм, составил 5,6 мкм. Для песка средней крупности ($M_{кр} = 2$) этот размер равен 0,18 мм; для трех-

фракционного щебня 5...40 — 8 мм; соотношение размеров частиц для портландцемента, песка и щебня — 1 : 32 : 1420.

Теоретически возможно иметь плотную структуру при условии $\delta_p = \beta_n$ или $\delta_{ш} = \beta_{ш}$, т. е. когда щель между частицами заполнителя составляет 0,006 мм для песка и 0,2 мм — для щебня; для пустотности заполнителя в уплотненном состоянии $\Pi_{п.у} = 28\%$ (песок) и $\Pi_{ш.у} = 12\%$ (щебень), $Z_{1,ш} = 0,83$, или $\Pi = 1780 \text{ кг}$ и $Z_{2x} = 0,95$, или $\Pi = 1470 \text{ кг}$. Именно эти значения расхода заполнителя и будут предельными для любого вида механического уплотнения.

Удобоукладываемость бетонных смесей определяется в соответствии с ГОСТ 10181.1—81. По показателям жесткости или подвижности их условно делят на две группы:

Жесткие, с:

Ж4	31 и более
Ж3	21...30
Ж2	11...20
Ж1	6...10

Подвижные, см:

П1	4 и менее
П2	5...9
П3	10...15
П4	16 и более

Однако на практике наиболее часто жесткость определяют по техническому вискозиметру. В этом случае показатель жесткости в 3...4 раза превышает значение, указанное выше.

При вибрационном уплотнении подвижных смесей особое значение приобретает обеспечение однородности свойств бетона по всему объему изделия, при уплотнении жестких — обеспечения необходимой интенсивности для сближения

крупных частиц. Физически эти процессы существенно различаются между собой.

В самом общем виде технические свойства бетона в зависимости от состава определяются концентрацией каждого из составляющих (цемента (Ц), песка (П) и щебня (Щ)) и соотношением В/Ц. Концентрация цемента в составе бетона не должна быть избыточной, но в то же время достаточной для обеспечения сплошности бетона как композиционного материала. Повышение пластических свойств бетонной смеси возможно в результате увеличения Ц и В/Ц. Но повышение значения В/Ц — это создание избыточной пористости, так как для гидратации цемента требуется всего 15 % воды. В бетонных смесях чаще приходится оперировать со значениями $В/Ц > 0,5$.

Для определения структуры используют характеристики плотного бетона. истинное водоцементное отношение $(В/Ц)_{ист}$, объемную концентрацию цементного камня С и степень гидратации цемента β. Истинное водоцементное отношение рассчитывают по формуле

$$(В/Ц)_{ист} = В/Ц - В_п n - В_щ m, \quad (1.19)$$

где $В_п$, $В_щ$ — водопоглощение соответственно песка и щебня; n , m — отношение соответственно П/Ц и Щ/Ц

Объемная концентрация цемента влияет на макроструктуру бетона, а водоцементное отношение и степень гидратации цементных зерен — на его микроструктуру. Зная зерновой состав, крупность зерен мелкого и крупного заполнителя, можно определить удельную поверхность и ориентировочную толщину цементной пленки, качество которой зависит от В/Ц. С увеличением водоцементного отношения возрастает общая по-

ристость бетона:

$$П_0 = \frac{(В/Ц - 0,23\beta) Ц + (1 - K_y) \cdot 1000}{1000}, \quad (1.20)$$

где β — степень гидратации цемента; Ц — количество цемента; K_y — коэффициент уплотнения бетонной смеси.

Особенно большое влияние на долговечность и морозостойкость оказывает капиллярная пористость, определяемая по водопоглощению:

$$П_k = \frac{В - 0,5Ц}{1000} \cdot 100 \, \%.$$

Ориентировочная количественная зависимость между капиллярной пористостью и морозостойкостью по данным Г. И. Горчакова:

Капиллярная пористость, %		6	7,5	9
Морозостойкость, циклы	250	150	75	

Таким образом, технические свойства бетона определяются составом бетонной смеси, от которого зависят и его технологические свойства. Эти зависимости носят подчас противоречивый характер. Для повышения технических свойств необходимо уменьшать количество цемента, его концентрацию или толщину пленки цементного камня, а также водоцементное отношение. Напротив, для улучшения технологических свойств целесообразно стремиться к увеличению цемента, его концентрации и водоцементного отношения

1.2. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Многие реальные тела не обладают каким-либо одним механическим свойством. Процесс их деформирования (уплотнения) бывает сложен, а деформативные характеристики занимают некоторое промежуточное положение между вязкими жидкостями и твердыми телами. Такие сложные системы, к которым относится и бетонная смесь, во времени при различных нагрузках (напряженно-деформированном состоянии) ведут себя неоднозначно и характеризуются реологическими свойствами. При описании реологических свойств обычно используют упругость, пластичность и вязкость (модели Гука, Сен-Венана, Ньютона). Основные понятия об этих свойствах рассматриваются в работах по физико-химической механике [17, 20, 26]. Наряду со свойствами коллоидных частиц свойства бетонных смесей определяются их составом, водоцементным отношением, вводимыми в состав бетонных смесей поверхностно-активными веществами (ПАВ). Второй, столь же важный фактор, — напряженно-деформированное состояние, от которого зависит, какие из свойств бетонных смесей будут проявляться.

Рассмотрим в качестве примера зависимость между напряжениями и деформациями в затвердевшем бетоне (рис. 1.10). На участке OA происходит упругая деформация образца с модулем упругости $E_0 = \frac{\sigma_A}{\epsilon_A}$, на участке AB появляется пластическое течение. Если в точке B разгрузить образец, то останется остаточная часть деформации $\epsilon_{ост}$, характеризующая пластические измене-

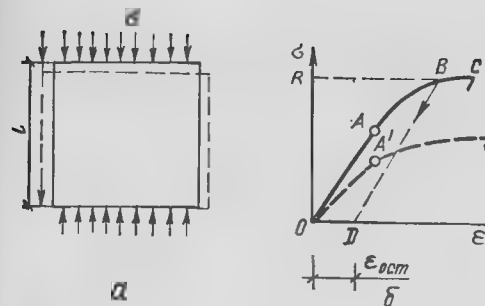


Рис. 1.10. Испытание на одноосное сжатие бетонного образца:

a — схема испытания; b — зависимость «напряжение — деформация»

ния в бетоне. На участке BC протекает только пластическая деформация. В зависимости от длительности процесса диаграмма трансформируется: при длительном приложении нагрузки значительно уменьшается уровень, характеризующий предел текучести σ_t (прочность материала R). В этом случае на диаграмме « σ — ϵ » будут преобладать пластические деформации, их значения значительно увеличатся, увеличатся и остаточные деформации $\epsilon_{ост}$, может измениться также модуль упругости (участок OA). Аналогичные изменения произойдут при сжатии бетонной смеси в замкнутом сосуде.

В зависимости от вида напряженно-деформированного состояния могут быть использованы различные модели состояния (Гука, Ньютона, Кулона, Сен-Венана). Так, для случая подвижных виброорганов, так называемых вибронасадков, при описании процесса формирования, которое определяется истечением через вибрационную щель, используется модель Ньютона, в более

сложных напряженных состояниях — модель Бингама или Кельвина — Фойгта.

Характер зависимости между нормальными и касательными (сдвиговыми) напряжениями

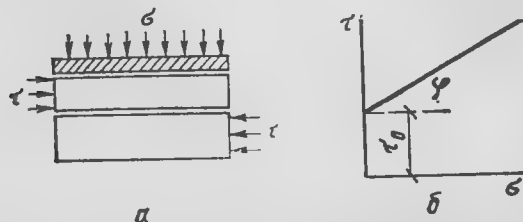


Рис. 1.11. Испытание на сдвиг бетонного образца:
а — схема испытания; б — зависимость между нормальными и касательными (сдвиговыми) напряжениями

(рис. 1.11) записан Кулоном в следующем виде:

$$\tau = \tau_0 + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.21)$$

где τ_0 — предельное напряжение сдвига; σ — нормальные напряжения; φ — угол внутреннего трения.

При определении удобоукладываемости целесообразно оценить значение предельного напряжения сдвига τ_0 , которое в зависимости от осадки конуса или жесткости бетонных смесей может изменяться в пределах от 50 до 1500 Па. По данным Л. А. Файтельсона для бетонов с осадкой конуса 1...7 см предельное напряжение сдвига составляет от 2000 до 14 000 Па [17]. Эти предельные характеристики τ_0 сравнили с численными значениями вязкости, получаемыми при других методах измерения. Предельное напряжение сдвига или, в самом общем виде, предел текучести зависит от степени коагуляции или кристаллизации цементного теста, а также от зацепления

(сцепления) мелкого и крупного заполнителя между собой.

Модель Кулона бывает целесообразна для описания поведения не только бетонной смеси, но и отформованного бетона при немедленной распулке изделий. Тогда значение τ_0 и угол внутреннего трения φ определяют возможную высоту формирования изделий из жестких или вакуумированных бетонных смесей.

Одно из важных свойств бетонной смеси — вязкость, характеризующаяся сопротивлением деформации сдвига или скольжения одного слоя по другому. Это может быть также и сопротивление при данной оптимальной скорости деформации от действия нормальных напряжений. Модель Ньютона выражается уравнением состояния

$$\sigma = \nu \dot{\epsilon}, \quad (1.22)$$

где ν — коэффициент вязкости; $\dot{\epsilon}$ — скорость относительной деформации.

Для случая вязких жидкостей зависимость между σ и $\dot{\epsilon}$ носит линейный характер, величина ν (или ν_n) характеризует коэффициент вязкости (рис. 1.12). В более общем случае в структурированных дисперсных системах возникает струк-



Рис. 1.12. Испытание на вязкость бетонного образца:

а — модель Ньютона;
б — зависимость «напряжение — скорость деформации»; 1 — вязкая жидкость; 2 — псевдожид-

кости

турная вязкость $\nu_{стр}$. Ее можно преодолеть в процессе вибрационного уплотнения только при определенном значении ε . Тогда вязкость в точке E согласно зависимости Ньютона будет выражена осредненным значением коэффициента вязкости псевдожидкости ν_* .

Величины τ_0 (σ_m) и $\nu_{стр}$ характеризуют сопротивление деформированию в структурированных дисперсных системах. Их природа определяется силами сцепления коагулированных систем, в которых развиваются процессы кристаллизации. В ряде случаев эти две разные характеристики совместно участвуют в процессе сопротивления при формировании бетонных смесей, поэтому сложно выделить влияние σ_m или $\nu_{стр}$ на общий процесс формообразования или уплотнения.

Модель Бингама представляет собой последовательное соединение упругого, пластического и вязких элементов. Уравнение состояния такого тела можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \text{ при } \sigma < \sigma_m; \quad (1.23)$$

$$\varepsilon = \frac{(\sigma - \sigma_m) t}{\nu} + \frac{\sigma}{E} \text{ при } \sigma > \sigma_m.$$

(σ_m — предел текучести; ν — коэффициент вязкости системы).

Модель среды Бингама во многих случаях удовлетворительно характеризует свойства растворных и бетонных смесей [2, 10, 14].

Исследования авторов в основном базируются на модели Кельвина — Фойгта, представляющей собой параллельное соединение упругих и вязких элементов. В этом случае сила N необходима для деформирования (уплотнения) бетонной

смеси:

$$N = EFe + H \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (1.24)$$

где F — площадь уплотняемого столба; H — вязкое сопротивление по высоте столба бетонной смеси; $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ — скорость деформации.

Складывая силы, действующие на элемент столба бетонной смеси толщиной dx (рис. 1.13),

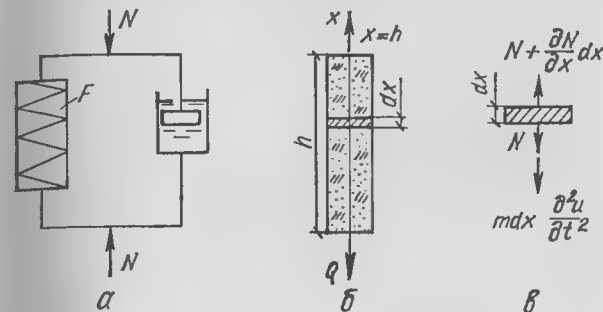


Рис. 1.13. Уплотнение столба бетонной смеси: а — модель Кельвина — Фойгта; б — схема столба бетонной смеси; в — схема действия сил при виброуплотнении

получим:

$$N + \frac{\partial N}{\partial x} dx - N - mdx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0;$$

$$\frac{\partial N}{\partial x} = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (1.25)$$

(u — перемещения слоя при вибровоздействии).

Используя представления Кельвина — Фойгта (1.24) о силе N , получим для всего столба с учетом вынуждающей гармонической силы $Q \cos \omega t$, действующей в нижней части столба, следующее

выражение:

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - H \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = Q \cos \omega_0 t \quad (1.26)$$

Для определения собственных колебаний при виброуплотнении приведем уравнение к единичному столбу бетонной смеси, разделив на F :

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + q \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} = 0, \quad (1.27)$$

где $\rho = \frac{m}{F}$ — удельная погонная масса бетонной смеси; $q = \frac{H}{F}$ — коэффициент вязкого трения в единичном столбе.

Изучение волновых явлений на высоком столбе бетонной смеси представляет самостоятельную задачу теории вибрационного уплотнения. Поскольку в таком высоком столбе реализуются различные волновые процессы (различные перемещения u , ускорения A_g), столб оказывает в разных сечениях различное давление N , определяющее в конечном счете степень уплотнения и прочностные свойства бетона.

1.3. ТИКСОТРОПНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Как известно, тиксотропия — это особенность систем изменять свои свойства (предельную текучесть или структурную вязкость) при механических (динамических) воздействиях. Согласно представлениям физико-химической механики [20], концентрированный гель механическим воздействием можно перевести в псевдожидкое состояние — золь. По прекращении воздействия наступает обратный процесс: золь вновь превращается в гель с ориентированными и прочными

структурными связями и ван-дер-ваальсовыми силами. Тиксотропные явления в основном зависят от интенсивности и частоты при динамическом воздействии. По гипотезе П. А. Ребиндера и его последователей [17, 20, 26] существует предельное значение скорости сдвига при вибрировании, вызывающее переход бетонной смеси из состояния упруго-пластического в состояние временной текучести. Если медленно повышать скорость сдвига, то в начале процесса разжижение не произойдет. После достижения некоторого определенного значения скорости наблюдается переход в состояние временной текучести, при повышении скорости структурная вязкость понизится еще больше, но уже дальнейшее увеличение сдвига не вызовет снижения вязкости, а приведет к расслоению смеси и уменьшению прочности бетона. Зависимость структурной вязкости от интенсивности колебаний имеет вид [20]:

$$\nu = \nu_0 + \frac{\alpha}{I}, \quad (1.28)$$

где ν_0 — вязкость предельно разрушенной структуры; α — коэффициент тиксотропии; I — интенсивность колебаний, пропорциональная скорости.

Различные исследователи определяют эффективность виброуплотнения в зависимости от удобоукладываемости бетонной смеси, размеров частиц заполнителя, количества жидкой фазы, амплитуды, частоты, формы колебаний, направления вибрации.

Дискуссионным остается вопрос о влиянии частоты колебаний на уплотнение бетонной смеси. Некоторые исследователи частоту колебаний рассматривают с точки зрения возможного резонан-

са самих частиц. А. Е. Десов, Г. Я. Куннос, Р. Лермит объясняют явление резонанса тем, что бетонная смесь обладает упругими свойствами и подтверждают зависимость эффективности частоты вибрирования от размеров частиц заполнителя. Для объяснения явлений резонанса вводилось понятие о резонансе частиц смеси определенной крупности.

Значения собственных частот колебаний в пределах от 10 до 200 Гц для цементного геля в зависимости от водосодержания получены И. Н. Ахвердовым [12].

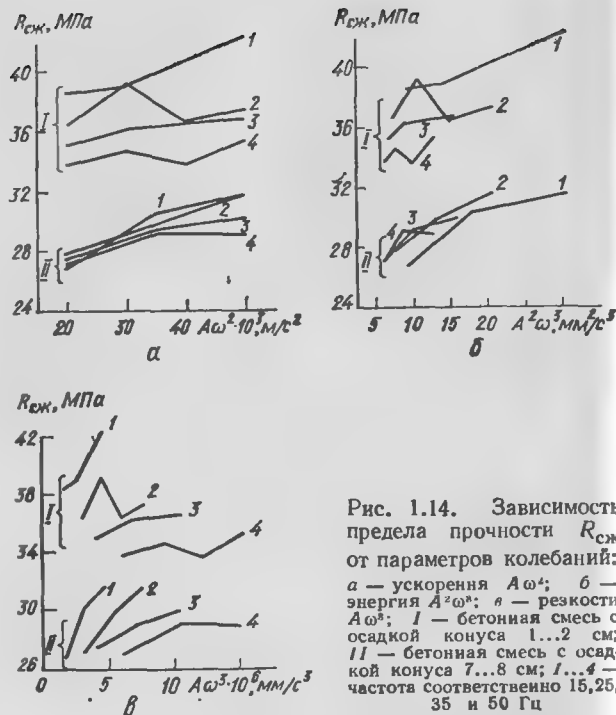
Идея резонанса частиц привела к предположению об эффективности поличастотной вибрации. В работах Г. Я. Кунноса, В. Н. Шмигальского и других исследователей [14, 29] показана зависимость эффективности поличастотного вибрирования от соотношения частот и угла сдвига фаз между составляющими колебаниями, что возможно лишь в том случае, когда одно из составляющих увеличивает интенсивность другого, т. е. при возрастании суммарной амплитуды колебаний.

Оптимальное значение амплитуды колебаний взаимосвязано с частотой, крупностью заполнителя, жесткостью бетонной смеси. Экспериментально установлено, что с увеличением жесткости смеси и крупности заполнителя амплитуду следует повышать. Очевидно, что каждый конкретный способ уплотнения требует определенной оптимальной амплитудной области в зависимости от свойств бетонной смеси. Значения между минимальной и максимальной амплитудой ($A_{\max} - A_{\min}$) характеризуют область технологической устойчивости режимов виброуплот-

Рекомендации по рациональным амплитудно-частотным параметрам разноречивы, однако ясно, что ни частота, ни амплитуда однозначно не определяют эффект виброуплотнения. В связи с этим оценка критерия эффективности вибрации должна включать сочетания этих двух параметров. Эффект вибрационного воздействия определяется интенсивностью I . В работах по физико-химической механике в качестве интенсивности принята скорость колебаний $A\omega$ (A — амплитуда колебаний, мм; ω — угловая частота колебаний, рад/с; $f = 2\pi\omega$, где f — частота колебаний, Гц).

При оценке эффективности вибрационного формовочного оборудования используют различные сочетания амплитуды и частоты $A'\omega^k$, в которых значения i и k принимают в пределах: $1 < i < 2$; $1 < k < 3$.

Наиболее часто в качестве критерия вибровоздействия применяются сочетания: $A\omega^2$ — ускорение [1, 3, 8, 12]; $A^2\omega^2$ — затраченная работа [17]; $A^2\omega^3$ — энергия [23, 29]; $A\omega^3$ — резкость [22]. Ускорение и энергетический критерий (рис. 1.14, а, 1.14, б) примерно однозначно определяют процесс уплотнения умеренно подвижных и подвижных смесей. Однако предпочтение следует отдать ускорению, которое можно замерять с использованием существующих видов датчиков. Значение ускорения также однозначно характеризует процесс и при асимметричных (ударно-вибрационных) режимах колебаний. Зависимость $A\omega^3$ справедлива для определенных условий, например, виброистечение бетонной смеси через щель экструдера (вибронасадка). В случае, представленном на рис. 1.14, а, она показывает качественно отличный результат. Поэтому в «Рекомендациях по вибрационному формова-



нию железобетонных изделий» [21] определяющими параметрами назначены ускорение $A\omega^2$ или энергия $A^2\omega^3$.

В качестве параметра, определяющего интенсивность вибрационных режимов, авторы приняли ускорение $A\omega^2$, которое определяют как в единицах ускорения силы земного притяжения (g), так и в m/c^2 ($1g = 9,8 m/c^2$)

Рассмотрим влияние режима и составов растворных и бетонных смесей на вязко-пластически

свойства. Наиболее доступно использование метода Стокса по всплытию или погружению шарика различной массы и замеры при этом вязкости или предельной текучести.

В вискозиметре шарик всплывает под действием вибрации и груза массой m с умеренными

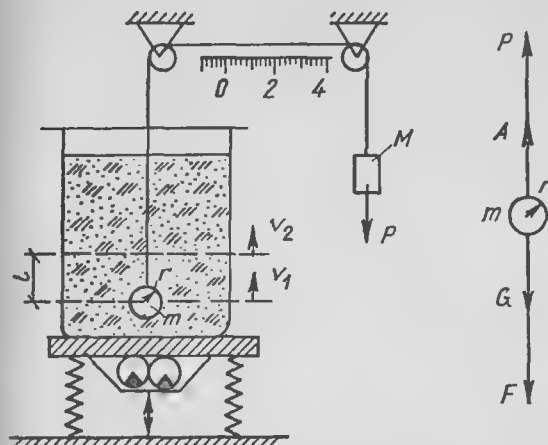


Рис. 1.15. Схема шарикового вискозиметра и сил, действующих на шарик:

1 — рассматриваемый участок столба бетонной смеси; v_1 , v_2 — скорости на границах участка; r — радиус шарика; m — масса шарика; M — масса дополнительного груза; P — сила всплытия

скоростями (v_1 , v_2 , ..., v_n) в сечениях столба бетонной смеси (рис. 1.15). Всплытие происходит при вертикально направленном вибровоздействии снизу. Шарик — неметаллический во избежание влияния на него магнитного поля с радиусом r , в 3...4 раза большим условного радиуса крупного заполнителя.

На шарик действуют сила всплытия P , Архимедова A и собственного веса G , сила трения F ,

выраженная по формуле Стокса через среднюю скорость на рассматриваемом участке столба бетонной смеси L , и коэффициент динамической вязкости ν .

Поскольку на границах рассматриваемого участка длиной l возможно возникновение неодинаковых скоростей движения шарика, для решения задачи о его движении воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии. Имеем:

$$\frac{mV_2^2}{2} - \frac{mV_1^2}{2} = (-G - F + A + P)l, \quad (1.29)$$

где

$$G = \rho_{\text{ш}} V_{\text{ш}} g; \quad F = 6\pi r \nu \frac{v_1 + v_2}{2};$$

$$A = \rho_{\text{б.с.}} V_{\text{ш}} g; \quad P = Mg; \quad (1.30)$$

m — масса шарика; $\rho_{\text{ш}}, \rho_{\text{б.с.}}$ — плотность шарика и бетонной смеси; $V_{\text{ш}} = \frac{4}{3}\pi r^3$ — объем шарика; r — радиус шарика; g — ускорение свободного падения; ν — коэффициент динамической вязкости; M — масса дополнительного груза.

Подставляя значения (1.30) в уравнение (1.29) и выполняя преобразования, запишем расчетную формулу

$$\nu = \frac{2}{6\pi r (v_1 + v_2)} \left[Mg + \frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho_{\text{б.с.}} - \rho_{\text{ш}}) - \frac{m}{2l} (v_2^2 - v_1^2) \right]. \quad (1.31)$$

Из формулы (1.31) при $M = 0$ и $v_1 = -v_2 = -v$ получаем известную формулу Стокса

$$\nu = \frac{2}{g} \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{б.с.}}) r^2 g}{v} = \frac{2}{g} \frac{(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{б.с.}}) r^2 g t}{l}, \quad (1.32)$$

где t — время движения шарика.

Рассмотрим в качестве примера всплытие двух шариков разной плотности: $\rho_{\text{ш1}} = \rho_{\text{б.с.}} = 2450 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{ш}} = \rho_{\text{р}} = 1500 \text{ кг/м}^3$, при одинаковой массе дополнительного груза $M = 0,25 \text{ кг}$. Использована бетонная смесь такого состава на 1 м^3 : Ц = 295 кг; П = 583 кг; Ш = 1313 кг; В/Ц = 0,48; пластифицирующая добавка СДБ — 2 % сухого вещества от массы цемента составляет 5,9 кг. Добавка взята в таком количестве, чтобы исключить твердение. Щебень фракции 5... 10 мм, жесткость бетонной смеси 20 о по ГОСТ 10181.1—81. Оба использованных шарика имели пластмассовый корпус, заполненный свинцовой дробью, залитой эпоксидной смолой, и одинаковый радиус ($r = 1,7 \text{ см}$).

При определенных параметрах вибровоздействия на бетонную смесь показания по движению шарика вверх фиксировали секундомером через каждые 2 см пути его перемещения. Затем подсчитали среднюю скорость на каждом дискретном отрезке пути длиной 2 см. При найденных средних значениях скоростей $v_{\text{ср}}$ для двух смежных отрезков по формуле (1.31) вычислили значение коэффициента динамической вязкости (табл. 1.3).

Анализ результатов показывает, что с увеличением ускорения вибростенда с $1,25 \text{ g}$ до $1,75 \text{ g}$ при одной и той же частоте коэффициент динамической вязкости снижается. Это положение не противоречит физическим представлениям о тиксотропном разжижении бетонной смеси при воздействии на нее вибрации. Изменение плотности шарика также существенно изменило коэффициент динамической вязкости. Гипотетически неоднозначность коэффициента динамической вязкости при изменении силы всплытия шарика можно объяснить лишь тем, что, применяя фор-

Таблица 1.3. Результаты определе

Номер участка	Сечения L через 2 см	Ускорение вибростенда $A_g = 1,25g$		
		$\sigma_{ш} = \rho_{б.г} = 2451 \text{ кг/м}^3$		$\omega = \nu_p =$
		$\nu_{ср}, \text{ м/с}$	$\nu, \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\nu_{ср}, \text{ м/с}$
1	0—2	0,0008	14 280	0,00082
2	2—4	0,00125	12 047	0,00082
3	4—6	0,00118	12 673	0,00091
4	6—8	0,00113	13 744	0,00111
5	8—10	0,001	13 011	0,00111
6	10—12	0,00125	11 710	0,001
7	12—14	0,00125	18436	0,00105
8	14—16	0,00222	4706	0,00174
9	16—18	0,004	—	0,00308

мулу Стокса, надо ввести дополнительные ограничения. Поэтому приведенная методика может быть использована как экспресс-методика качественного определения вязких свойств бетонной смеси только при одной варьируемой переменной, например: для определения рациональных параметров вибровоздействий на бетонную смесь или эффекта от введения определенного количества добавки-пластификатора или характера распределения степени тиксотропного разжижения по высоте столба, только обязательно при прочих равных условиях.

Обращает на себя внимание, что значения вязкости находятся в пределах 3000...17 000 Па · с. Конечно, эти ориентировочные значения требуют проверки более строгими методами. Однако порядок цифр близок к результатам измерений других авторов.

Тиксотропные свойства изучали на площадке с вертикально направленными колебаниями при

ния вязкости по всплыванию шариков

1500 кг/м	Ускорение вибростенда $A_g = 1,75g$			
	$\nu_{ш} = \rho_{б.г} = 245 \text{ кг/м}^3$		$\nu_{ш} = \rho_{б.г} = 1500 \text{ кг/м}^3$	
	$\nu, \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\nu_{ср}, \text{ м/с}$	$\nu, \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\nu_{ср}, \text{ м/с}$
17 250	0,00182	7246	0,00111	11 998
16 922	0,00222	5763	0,00133	11 006
14 493	0,00286	4729	0,00133	11 347
13 187	0,00333	5022	0,00125	11 347
13 874	0,0025	5462	0,00133	11 347
14 281	0,00286	4010	0,00125	9536
10 492	0,00444	3101	0,00182	6255
6073	0,005	1600	0,00286	3072
—	0,0133	—	0,00667	—

различных частотах (влияние состава на тиксотропные свойства дисперсных систем выполнено под руководством авторов книги канд. техн. наук Н. И. Ордой). Тиксотропной системой являлось грунтовое тесто из лессовидного суглинка Елизаветинского карьера с содержанием 16...20 % глинистых, 40...55 % пылеватых и 30...50 % песчаных частиц крупностью до 0,5 мм. Лессовидный суглинок с числом пластичности 10...12 затворяли водой до получения теста с предельным напряжением сдвига $\tau_0 = 16 \text{ кПа}$. Грунтовое тесто заполняли на высоту металлического цилиндра диаметром 7 см и высотой 17 см, цилиндр жестко крепили к виброплощадке и подвергали воздействию вибрации. Через 2...3 мин после получения грунтовым тестом устойчивого тиксотропного разжижения в сосуд 10-кратно опускали металлический шарик диаметром 2 см. Замеряли время опускания шарика на глубину 10 см. Результаты времени

опускания шарика в зависимости от частоты колебаний представлены на рис. 1.16, а. В этих экспериментах ускорение изменялось от 1 до 5g.

Для изучения влияния массовой доли мелких частиц в составе на тиксотропные свойства смеси проведены дополнительные эксперименты.

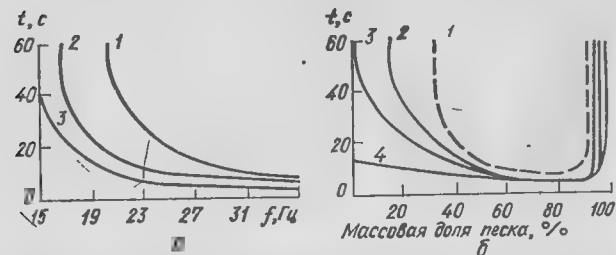


Рис. 1.16. Зависимость времени погружения шарика а грунтовое тесто от параметров колебаний и состава смеси: а — частота колебаний; б — массовая доля частиц песка; 1... 4 — амплитуда соответственно 0,75; 0,9; 1 и 2,7 мм

Смесь суглинка с песком фракций от 0,314 до 0,31 мм приготавливали с постоянным значением $\tau_0 = 0,42$ кПа. Содержание песка изменяли от 0 до 100 % в массовом отношении. Как следует из рис. 1.16, б 5...7 % мелких частиц обеспечивают высокую степень тиксотропного разжижения. Таким образом, содержание 250...300 кг цемента в 1 м³ (2400 кг) бетонной смеси позволит обеспечить доступную степень тиксотропного разжижения.

Весьма интересны результаты по изучению скорости всплытия шарика [13]: если для жесткой смеси выдергивание происходит быстрее при частоте 15 Гц и замедляется с увеличением частоты до 25 и 45 Гц, то в пластичной бетонной смеси наблюдается обратное явление (рис. 1.17).

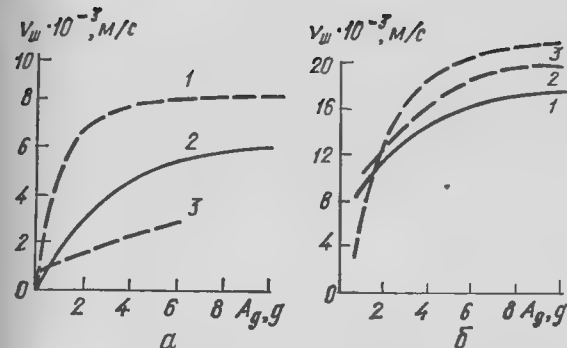


Рис. 1.17. Зависимость скорости всплытия шарика $v_{ш}$ под действием выдерживающего груза массой 240 г от ускорения и частоты колебаний:

а — для бетонных смесей жесткостью, равной 60 а; б — для бетонных смесей с осадкой конуса 5...6 см; 1...3 — при частоте соответственно 15, 25 и 45 Гц

Это можно объяснить тем, что в жестких смесях шарик преодолевает в основном пластическое сопротивление (трение и зацепление), а в пластичных — вязкое. При колебаниях низких частот по сравнению со средними силы трения и зацепления снижаются в жестких бетонных смесях в 3...5 раз. Для подвижных смесей в условиях низких частот силы вязкого сопротивления будут выше, чем при средних частотах, но не столь значимо.

При изучении тиксотропных свойств цементного теста с В/Ц = 0,25, равном нормальной густоте портландцемента Каменец-Подольского завода, эксперименты выполняли в цилиндрическом сосуде диаметром 15 и высотой 15 см. Цементное тесто укладывали на высоту 11 см и уплотняли постукиванием по краю цилиндра. Затем при воздействии вертикальной вибрации различной частоты замеряли время погружения

металлического шарика диаметром 2 см на глубину 10 см (шарик закрепляли на невесомой нити).

Из табл. 1.4 следует, что с увеличением частоты вибрации при любом ускорении возрастает значение тиксотропного разжижения и каждой частоте вибрации соответствует определенное рациональное значение ускорения, при котором цементное тесто получает значение тиксотропного разжижения, близкое к максимальному. Так, для частот 10...15 Гц рациональное ускорение составляет 2,0...3,0g, для частот 40...50 Гц — 3,0...4,0g.

Таблица 1.4. Время погружения шарика в цементное тесто в процессе вибрирования, с

Частота, Гц	Ускорение колебаний, g				Частота, Гц	Ускорение колебаний, g			
	1,5	2,0	3,0	4,0		1,5	2,0	3,0	4,0
10	49	25	5	—	30	26	18	16	14
15	33	19	20	—	40	23	18	15	14
20	29	22	17	12	50	21	16	14	12

В условиях асимметричной вибрации нижнее ускорение было получено до 9,0...10g, а верхнее изменяли от 1,5 до 4g. При частоте 50 Гц режим вибрации был симметричный (табл. 1.5).

Характерно, что при всех частотах для асимметричных режимов рациональное значение верхнего ускорения достигает примерно 2,0...2,5g. Таким образом, в условиях асимметричных режимов наибольшее тиксотропное разжижение проявляется при верхнем ускорении, равном 2,0...2,5g, и нижнем — 5...7g.

Таблица 1.5. Время погружения шарика в цементное тесто при ударно-вибрационном воздействии, с

Частота, Гц	Верхнее ускорение, g				
	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
10	20	14	11	11	—
15	22	15	15	11	11
20	21	14	12	11	10
30	22	15	13	10	9
50	21	16	13	11	9

1.4. УПЛОТНЕНИЕ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЯХ

При динамических воздействиях на среду в ней начинают распространяться продольные, поперечные и другие виды волн. Свойства среды определяют скорость их распространения и затухания. Обычно для упругого стержня скорость распространения продольных волн принято определять по формуле

$$c = \sqrt{E/\rho}. \quad (1.33)$$

Затухание колебаний вычисляют по следующим выражениям:

$$A = A_0 e^{-\beta r}$$

или

$$\beta = \frac{\ln A_0 - \ln A}{r}, \quad (1.34)$$

где A — амплитуда колебаний в определяемой точке; A_0 — амплитуда возмущения; β — линейный коэффициент затухания; r — расстояние от источника колебаний до исследуемой точки.

В этом случае скорость распространения будет зависеть от упругих свойств среды, а коэф-

коэффициент затухания — от вязких и пластических свойств. Известно, что скорость распространения волн в бетонной смеси составляет 30...300 м/с [1, 8, 10, 12, 23, 29]. Еще более противоречивы данные по коэффициенту затухания, который изменяется от 1 до 5 м⁻¹ [9, 12, 17].

Процесс распространения и затухания описывается выражением (1.27) с использованием модели Кельвина — Фойгта:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t}$$

Принимаем следующие граничные условия, представленные на рис. 1.13:

при $x = 0$

$$u = u_0 \cos \omega t; \quad (1.35)$$

при $x = h$

$$\sigma(h, t) = \left(-E \frac{\partial u}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) = 0.$$

Решение для установившегося режима колебаний находим в виде суммы затухающих прямой и отраженной волн:

$$u = e^{-\alpha x} [A_1 \cos(\omega t - \gamma x) + A_2 \sin(\omega t - \gamma x)] + e^{\alpha x} [A_3 \cos(\omega t + \gamma x) + A_4 \sin(\omega t + \gamma x)]. \quad (1.36)$$

В выражении (1.36) $\alpha = \psi_1(E, \nu)$ и $\gamma = \psi_2(E, \nu)$.

После всех преобразований получим:

$$E = \frac{\omega^2 h^2 \rho (m^2 - n^2)}{(m^2 + n^2)^2}; \quad (1.37)$$

$$\nu = \frac{\omega h^2 \rho \cdot 2mn}{(m^2 + n^2)^2}, \quad (1.38)$$

где m и n — безразмерные константы.

Величины m и n будут зависеть от соотношения перемещений в точках x (u_x) и $x = 0$ (u_0), а также от сдвига фаз продольных волн между точками 0 и x .

Для определения коэффициента затухания колебаний на различных условиях по высоте слоя использовано решение И. П. Бриедиса для измерения давления в слоях бетонной смеси [23]:

$$\frac{P}{P_0} = \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2\beta(h-x) - \cos 2k(h-x)}{\operatorname{ch} 2\beta h - \cos 2kh}}, \quad (1.39)$$

где P — амплитудное значение динамического давления в исследуемом слое бетонной смеси; P_0 — динамическое давление в нижнем слое; h — высота формуемого изделия; k — волновое число, равное отношению круговой частоты вибрации к фазовой скорости продольных волн по высоте столба бетонной смеси.

Анализ данных табл. 1.6 показывает, что скорость распространения колебаний значительно

Таблица 1.6. Скорости колебаний и коэффициента затухания при различных частотах

Частота колебаний f , Гц	Гармонические колебания в смесях		Ударно-вибрационные режимы в смесях ($\text{Ж} = 60 \text{ с}$)
	подвижных ($\text{ОК} = 11 \text{ см}$)	стационарных ($\text{Ж} = 60 \text{ с}$)	

Скорости распространения продольных волн, м/с

15	38...46	34...40	34...38
25	50...64	38...52	36...50
50	58...72	52...61	—

Коэффициенты затухания, м⁻¹

15	0,7...1,4	1,2...1,8	1,4...2,0
25	1,3...2,0	1,6...2,4	1,7...2,6
50	2,2...3,0	2,8...3,6	—

ниже скорости звука в воздухе, что объясняется наличием границ раздела фаз.

Небольшие скорости взаимосвязаны с малыми длинами волн λ :

$$\lambda = c/f. \quad (1.40)$$

Экспериментальные исследования выполнены в форме размерами $20 \times 90 \times 150$ см. Динамическое давление $P_{\text{дин}}$ и ускорение $A\omega^2$ по высоте слоев бетонной смеси при различных режимах вибровоздействия определяли с помощью датчиков давлений М-70 и ускорений ДУ-5. Для создания ударно-вибрационных режимов между формой и площадкой помещали упругие прокладки и обеспечивали эффект соударения при частоте колебаний виброплощадки 15, 25 и 50 Гц. На частотах 15 и 25 Гц изучались гармонические колебания с ускорением 1,5; 2,5; 3,5 g и асимметричные с ускорением соударения $A_{\text{сy}} = 4,0$; 6,0; 9,0g. Для симметричных режимов ускорения приняты равными 3,5; 5,0; 6,5g. Используются составы бетонной смеси жесткостью по техническому вискозиметру 20, 60 с и подвижные с осадкой конуса 11 см. В результате получены осциллограммы динамического давления и ускорения в слоях бетонной смеси, которые для различных частот представлены на рис. 1.18, 1.19 (экспериментальные данные Г. К. Чихладзе).

Замечено, что в бетонной смеси присутствуют растягивающие и сжимающие зоны, которые меняются местами в процессе вибрирования. Анализ показаний датчиков, расположенных по высоте, показывает, что значения ускорений и динамических давлений изменяются в большом диапазоне. По высоте столба имеются нулевые значения по ускорению и давлению, существенно

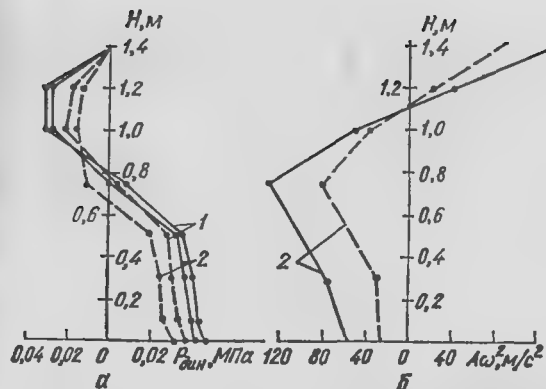


Рис. 1.18. Распространение колебаний по высоте столба бетонной смеси при частоте 15 Гц и ускорении возмущения 2,5g. Сплошной линией показан ударно-вибрационный режим, пунктирной — гармонический; 1, 2 — жесткость бетонной смеси по гехническому вискозиметру соответственно 20 и 60 с

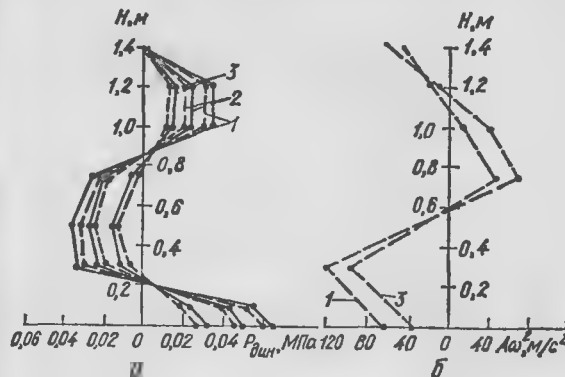


Рис. 1.19. Распространение колебаний по высоте столба бетонной смеси при гармонической частоте вибрирования 50 Гц (сплошной линией представлены данные для жесткости 20 с, пунктирной — 60 с):

1...3 — ускорения возмущения соответственно 6,5; 5 и 3,5 g

влияющие на процессы уплотнения. Нулевые зоны связаны со скоростью распространения волны, частотой колебаний и высотой столба, а также с затуханием колебаний.

Длины волн будут равны около 1...3 м, и поэтому в высоких столбах (изделия, изготавливаемые в вертикальном положении, — трубы, объемные элементы) могут возникать сложные явления наложения волн с существованием нулевых зон. На длину волны и скорость ее распространения влияют и вязко-пластические свойства (см. табл. 1.6).

Из выражений (1.33), (1.37), (1.38) получены значения динамического модуля упругости E и коэффициента динамической вязкости ν при симметричных режимах колебаний (табл. 1.7), из чего следует, что с повышением частоты вибрации возрастают динамические характеристики бетонной смеси.

Таблица 1.7. Значения динамического модуля упругости E и коэффициента динамической вязкости ν при различных режимах вибрации

Частота колебаний f , Гц	E , МПа		$\nu \cdot 10^6$, Па · с	
	ОК = 11 см	Ж = 60 с	ОК = 11 см	Ж = 60 с
15	1,27...2,74	0,88...1,6	10,98...23,7	9,16...18,8
25	2,73...3,9	1,28...2,69	14,77...28,11	10,4...20,26
50	3,26...5,63	2,27...3,72	13,37...21,4	14,2...24,44

Значения волновых параметров ν , E и β , возникающих в подвижных смесях при ОК = 2...11 см и частоте вибрации 8...50 Гц, были подсчитаны канд. техн. наук К. В. Черных. Как

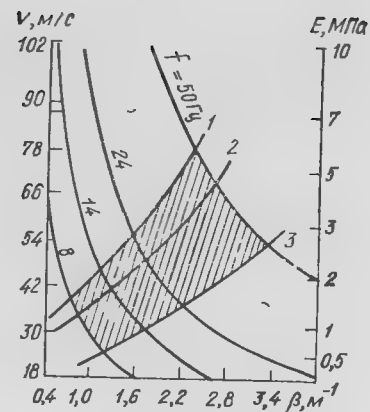


Рис. 1.20. Область фактических значений волновых параметров ν , E и β : 1 — ОК = 11 см с добавкой С-3; 2 — ОК = 11, без добавки; 3 — ОК = 2, без добавки

следует из результатов, с повышением упругих характеристик среды (E) растет скорость распространения упругих волн (рис. 1.20). С уменьшением коэффициента затухания β прослеживается тенденция к повышению E . При введении добавки С-3 уменьшаются силы внутреннего трения и сцепления между частицами, что приводит к снижению β и к повышению E и ν для каждой частоты вибрирования.

При колебаниях столба бетонной смеси важно не только распространение и затухание колебаний, но и взаимодействие «виброорган — бетонная смесь»: столб бетонной смеси при колебаниях на виброплощадке начинает вести себя как упругая система и его собственные колебания существенно отражаются на колебаниях виброплощадки. С этим явлением связано давление низа столба на виброплощадку. Таким образом, процесс распространения колебаний связан с определением так называемой «приведенной» или «присоединенной» массы бетонной смеси, которая необ-

ходима для нахождения фактической грузоподъемности виброплощадки, а также для оценки динамических давлений по высоте столба бетонной смеси, влияющих на процесс уплотнения.

В условиях волновых явлений в зависимости от отношения высоты столба h к длине волны λ при определенной частоте колебаний могут складываться различные ситуации, называемые формами колебаний. Форма I соответствует случаю, когда высота столба кратна $1/4$ длины волны;

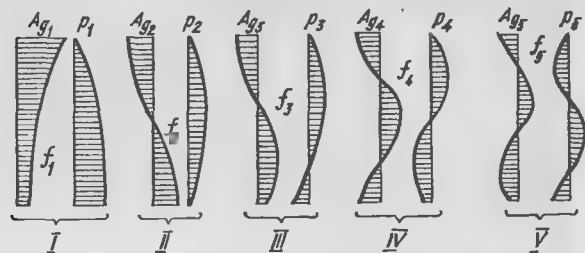


Рис. 1.21. Характер эпюр ускорений и давлений при различных формах колебаний столба:
I...V — формы колебаний

II — $1/2$ длины; III — $3/4$ и IV — полной длины волны ($h = \lambda$) (рис. 1.21). При форме I колебаний ускорение в нижней части столба будет минимальным, а в верхней — максимальным. Столб бетонной смеси колеблется как одномассная система в противофазе с виброорганом. Поэтому максимальное динамическое давление оказывается в нижней части. В этом случае виброорган и столб потребляют наибольшее количество энергии и можно ожидать, что значительная ее часть поглощается бетонной смесью.

При форме II колебаний верхняя и нижняя половины столба колеблются в противофазе.

Эпюра ускорений посередине имеет нулевую точку. Здесь же возникает максимальное динамическое давление. Значительная часть (половина) массы столба работает совместно с виброорганом и для достижения тех же значений ускорений, что и при первой форме колебаний, требуется значительно меньшая энергия вибростенда.

При III, IV и последующих формах колебаний масса столба еще больше дробится. Нулевыми зонами ускорения соответствуют максимальные ординаты эпюр давления и наоборот. При этом

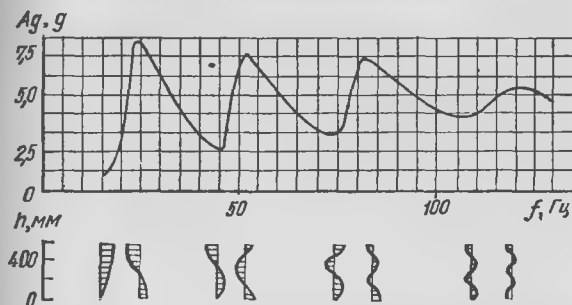


Рис. 1.22. Резонансные явления в нижней части столба бетонной смеси и соответствующие им формы колебаний

потребление энергии вибростендом и поглощение энергии столбом бетонной смеси постепенно уменьшается.

Переход от одной формы колебаний к другой при данной высоте столба происходит по восходящим и нисходящим ветвям кривых, показанных на рис. 1.22. Нижние экстремумы в отличие от верхних иногда называют антирезонансными. В районе нижних пиков потребление энергии больше, чем в районах, следующих за ними, и верхних.

Записи ускорений и давлений в слоях бетонной смеси по высоте столба $h = 60$ см при частотах 10; 25 и 15 Гц и ускорении стэнда $3g$ дали возможность построить эпюры в количественными значениями ординат (рис. 1.23).

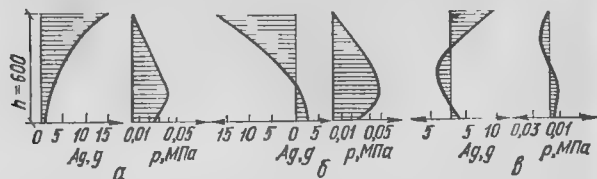


Рис. 1.23. Количественные эпюры ускорений и давлений по высоте столба:

$a-b$ — при I, II и III формах колебаний при частотах соответственно 15; 25 и 45 Гц

При форме I колебаний ускорения внизу столба достигают порядка $1g$, вверху — $15g$. Динамическое давление на высоте $1/3$ столба максимально (около $0,04$ МПа) и снижается до нуля к верхней поверхности столба бетонной смеси.

При форме II колебаний ускорение у виброоргана составляет $2,5g$, на $1/3$ высоты столба имеет нулевую точку и вверху столба достигает $17g$. Динамическое давление максимально при минимальном (нулевом) значении ускорения и составляет $0,05$ МПа.

При форме III колебаний ускорение в верхнем слое столба составляет только $9g$, эпюра имеет две нулевые точки. Динамическое давление значительно снижается, его максимальное значение составляет всего $0,01$ МПа.

Таким образом, при переходе от I и II форм колебаний к последующим наблюдается значительное снижение в слоях бетонной смеси как значений ускорений, так и давлений.

Уплотнение образцов высотой до 60 см из бетонной смеси жесткостью 60 с выполнено при расходе цемента $C = 325$ кг и $B/C = 0,5$ в цилиндрической форме диаметром 146 мм. При этом замеры ускорения и динамическое давление при различных высотах столба ($20, 40$ и 60 см). На рис. 1.23 представлены эпюры ускорений и давлений при высоте столба 60 см при уплотнении на полную высоту и слоями по 20 см. После 7-суточного твердения образцы разрушили послойным раскалыванием. Результаты оценки прочности показаны на рис. 1.24. Большие значения ординат и более равномерная эпюра получена при частоте колебаний 15 Гц, близкой к первому резонансу, минимальные значения ординат и наибольшая однородность прочности по высоте столба — при частоте 30 Гц при форме II колебаний. Увеличение ускорения с $2g$ до $3g$ незначительно увеличивает прочность, очевидно для столба существенное значение имеют резонансные явления и уплотнение при форме I колебаний. Первые резонансные частоты при различных высотах столба бетонной смеси после уплотнения столба при различных частотах вибрации:

Высота столба после уплотнения, см	58...60	40...45	20...21
Первая резонансная частота, Гц	13...18	19...23	41...56

Обращает внимание гиперболический характер зависимости «высота столба — резонансная частота». В слоях небольшой толщины резонансные частоты резко возрастают, что связано с необходимостью использования высоких частот при малой толщине слоя бетонной смеси.

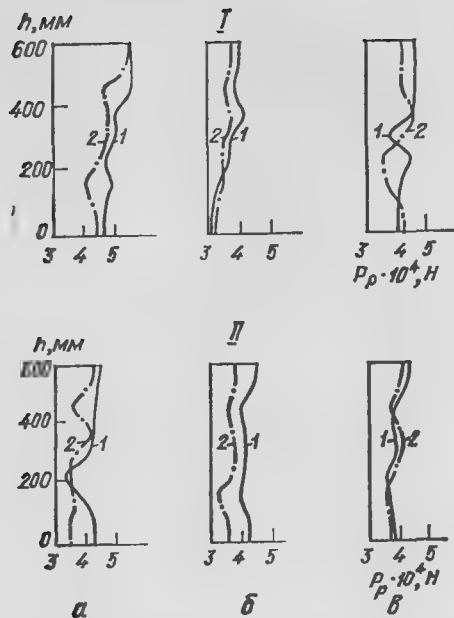


Рис. 1.24. Эпюры прочности при послойном раскалывании столба бегона высотой 60 см, уплотненного при различных толщинах слоев и частотах вибрации:

1 — на полную высоту столба; 2 — слоями по 20 см; а...б — при частоте соответственно 15, 30 и 50 Гц; 1, 2 — ускорения вибростолба соответственно равные 3g и 2g

По результатам экспериментов на столбах различной высоты получены данные о влиянии на прочность ускорения колебаний и динамического давления, обработанные статистически. В качестве переменных приняты: x_1 — давление (p); x_2 — ускорение (Ag). В кодовых значениях эти результаты представлены в виде зависимости $P_p = \varphi(p, Ag)$:

$$\begin{aligned} \text{при } f = 15 \text{ Гц } Y_{15} &= 5,048 + 0,015x_1 + \\ &+ 0,523x_2 + 0,058x_1x_2; \\ \text{при } f = 30 \text{ Гц } Y_{30} &= 3,787 + 1,97x_1 + \\ &+ 2,178x_2 + 0,026x_1x_2; \\ \text{при } f = 50 \text{ Гц } Y_{50} &= 4,496 + 0,119x_1 + \\ &+ 0,322x_2 - 0,75x_1x_2. \end{aligned}$$

Ускорение в слоях бетонной смеси при уплотнении оказывает на прочность большее воздействие, чем динамическое давление. Так, при $f = 15$ Гц ускорение в 30...40 раз больше влияет на прочность, чем давление, а при частоте $f = 50$ Гц — только в 3 раза, но при этом более значимо их взаимодействие.

1.5. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ВИБРОУПЛОТНЕНИЯ И ОЦЕНКА ПРОЦЕССА МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Рассматривая физическую сущность вибрационного процесса уплотнения, многие исследователи считают, что при вибрировании устраняется вредное влияние сил трения и сцепления, действующих на смежные частицы бетонной смеси. Из всех сил только сила тяжести стремится уплотнить бетонную смесь, а силы трения и сцепления препятствуют этому процессу. В то же время Д. Е. Десов [9, 10] подчеркивает, что эффект вибрирования зависит как от вязкости среды, так и от формы, размеров и характера поверхности частиц, количества твердой фазы, а главное — от значения и частоты импульсов, сообщаемых частицами бетонной смеси. Вибрация передает бетонной смеси импульсы, вследствие чего частицы колеблются около осредненного направления движения. Бетонная смесь переходит из состояния аморфного рыхлого тела в состояние «тяжелой жидкости». В этой релаксированной

бетонной смеси частицы перемещаются под действием силы тяжести и на поверхности выделяется воздух в виде пузырьков. О состоянии временной текучести раствора и бетонной смеси-подробно рассматривается в работах П. А. Ребиндера, Н. В. Михайлова, П. Ф. Овчинникова, Н. Б. Урьева [12, 20, 26]. Таким образом, процесс вибрационного уплотнения рассматривался как тиксотропное разжижение цементных систем и сближение частиц под действием сил тяжести.

В этих условиях процесс уплотнения условно делят на определенное количество стадий. Так, по мнению А. А. Афанасьева и О. А. Савинова, он делится на три стадии [1, 23]: на первой происходит перекомпоновка составляющих, на второй появляются оболочки и жидкая фаза на поверхности крупного заполнителя, на третьей — компрессионное сжатие смеси. Разделяя эту точку зрения на процесс вибрационного уплотнения, авторы книги считают его более сложным. В связи с представлением о бетоне как композиционном материале, имеющем макро- и микроособенности, целесообразно условно поделить процесс на две стадии: первая — перекомпоновки крупных составляющих (щебня) и образование макроструктуры; вторая — более глубоких тиксотропных изменений в мелкодисперсной (цементной) системе и формирование микроструктуры.

На первой стадии рекомендуются колебания низкой частоты с большой амплитудой перемещения, когда преодолеваются силы сцепления и сухого трения неуплотненных частиц бетонной смеси, что соответствует представлениям о бетонной смеси как модели с пластическими свойствами (модели Бингама). Для этого требуются достаточно большие амплитуды (1...5 мм) и необхо-

димая интенсивность по ускорению 1,5...3,5g для преодоления предельного напряжения сдвигу в зависимости от свойств среды и размеров крупного заполнителя.

На второй стадии происходит дополнительное уплотнение, которое будет протекать интенсивно при значительных тиксотропных изменениях. Для разжижения растворной составляющей целесообразны повышенные частоты или введение пластифицирующих добавок. Снижение вязкости описывается с использованием модели Кельвина — Фойгта.

Естественно, оба процесса происходят одновременно, но для низких частот и больших амплитуд быстрее протекает первая стадия, что хорошо иллюстрируется на рис. 1.17. Для средних (50 Гц) и повышенных частот на процессе уплотнения большее влияние оказывает тиксотропное разжижение (воздействие частот на всплытие шарика иллюстрируется на рис. 1.17).

В условиях асимметричных ударно-вибрационных режимов, которые реализуются с частотой 25 Гц и ниже в бетонной смеси наряду с низкочастотными колебаниями будет возникать спектр высокочастотных составляющих и при этом можно ожидать ускорения процесса первой стадии. Однако представляется, что для этого необходимы не только большие перемещения, но и возможность создавать условия для перекомпоновки частиц, применять ускорение в верхнем положении площадки 2,0g и выше, которые обеспечивали бы возможность перемещений частиц крупного заполнителя и их ускоренную перекомпоновку.

Действительно, ударные режимы осуществляются при частоте 200...300 ударов в 1 мин с амплитудой 5...7 мм. Но ускорение в верхнем поло-

жении ударного столба близко к $1g$ и, несмотря на большую эффективность ударных режимов (нижнее ускорение в момент соударения около $10g$), скорость процесса уплотнения при этом низка. В табл. 1.8 представлены экспериментальные данные канд. техн. наук Е. А. Синевой по скорости процесса уплотнения бетонных смесей различной жесткости.

Таблица 1.8. Время уплотнения при различных режимах

K_y	Ж, с	Режим уплотнения		
		симметричный ($f = 50$ Гц, $A_g = 3,5g$)	ударно-вибрационный ($f = 15$ Гц, $A_{gv} = 2,5g$, $A_{g\equiv} = 5...7g$)	ударный ($f = 5$ Гц, $A_g = 10g$)
0,98	20	30	15	90
0,98	50	150	50	170
0,95	75	300	120	220

Как видно из табл. 1.8, ударный режим по времени значительно более продолжителен по сравнению со стандартным и особенно ударно-вибрационным, что связано с физическими особенностями процессов уплотнения. Крупные частицы из-за низкого значения «верхнего» ускорения (в верхнем положении площадки) не могут изменить своего положения, не имеют возможности как бы разрыхлиться и обеспечить перекомпоновку, что снижает скорость процесса.

В настоящее время в технологии изготовления сборного и монолитного железобетона широкое распространение получили поверхностно-активные ПАВ — пластифицирующие добавки. Такие добавки суперпластифицирующего действия ти-

па С-3 позволяют существенно повысить удобоукладываемость с 2...3 см осадки конуса до 18...20 см. В технологии это обстоятельство используется для обеспечения повышенной удобоукладываемости смеси, снижения интенсивности вибрации или уменьшения расхода цемента при той же удобоукладываемости. Очевидно, следует ожидать изменение удобоукладываемости в технологии сборного железобетона с 1...3 см осадки конуса до 8...12 см. При использовании низкочастотных режимов расслаиваемость может снижаться как минимум в 1,5 раза.

Оценим процесс виброуплотнения, применяя методы теории подобия.

На процесс укладки оказывают влияние следующие параметры вибрационного режима и свойства бетонной смеси:

N_v — мощность передаваемого вибрационного воздействия FL/t ; A — амплитуда колебаний L ; ω — угловая частота колебаний $1/t$; t — время вибрирования; ρ — плотность укладки бетонной смеси при виброуплотнении $\frac{Ft^2}{L^4}$; τ_0 — сопротивление сдвигу бетонной смеси F/l^2 ; ν — вязкость бетонной смеси Ft/L^2 ; β — линейный коэффициент затухания колебаний $1/l$; l — приведенный размер зоны уплотнения L ; g — ускорение силы тяжести L/t^2 .

Определяющими параметрами для механического процесса укладки приняты: сила F , время t , длина l . Число безразмерных колебаний — согласно π -теореме (в этой задаче $10 - 3 = 7$) При составлении безразмерных комбинаций учтены известные физические и эмпирические зависимости. Например, на виброуплотнение оказывают влияние различные комбинации амплитуды и

частоты: $A\omega$, $A\omega^2$, $A^2\omega^3$, $A^3\omega^3$, что облегчает получение безразмерных комбинаций в следующем виде:

$$\frac{\rho f^3 A^2 \omega^3}{Nb}; \quad \frac{\rho A^2 \omega^3}{\tau_0}; \quad \frac{\rho A \omega}{\beta \nu};$$

$$\frac{N_B t}{\tau_0 f^3}; \quad \frac{N_B f^2}{\nu f^3}; \quad \frac{A \omega^2}{g}; \quad A\beta. \quad (1.41)$$

В самом общем виде плотность бетона выражена

$$\rho \left(\frac{A^2 \omega^3 f^3}{Nb}; \frac{A^2 \omega^2}{\tau_0}; \frac{A \omega}{\beta \nu} \right) =$$

$$= f \left(\frac{N_B t}{\tau_0 f^3}; \frac{N_B f^2}{\nu f^3}; \frac{A \omega^2}{g}; A\beta \right). \quad (1.42)$$

Из зависимости (1.42) можно сделать несколько качественных выводов:

процесс виброуплотнения функционально зависит от ускорения колебаний $A\omega^2$, его продолжительность связана с удельной мощностью и свойствами бетонной смеси;

использование вибрационных воздействий с большими амплитудами оказывает положительное влияние на уплотнение;

при повышенной жесткости бетонной смеси (больших значениях τ_0 и ν) следует увеличивать $A\omega$, $A^2\omega^2$.

В связи с разработкой нового направления по использованию для уплотнения бетонной смеси вибрации низких частот, авторами учтена существующая и сформулирована более общая гипотеза вибрационного уплотнения. Показано (см. формулу (1.41)), что процесс во времени определяется удельной мощностью вибрационного воздействия (N/f^3) и свойствами бетонной смеси τ_0 и ν в следующем виде:

$$\frac{Nt}{\tau_0 f^3} = \text{const} = C_1; \quad \frac{Nt^2}{\nu f^3} = \text{const} = C_2. \quad (1.43)$$

Таким образом, сложный процесс вибрационного уплотнения характеризуется необходимостью преодоления сил трения, сцепления и вязкого сопротивления. В этом случае конечное состояние бетонной смеси зависит, во-первых, от сближения крупных и мелких частиц заполнителей, для которого характерно преодоление взаимных сил трения и сцепления между частицами. Во-вторых, уплотнение — это перераспределение цементного теста, связанное с его тиксотропным разжижением. Безусловно, эти стороны одного и того же процесса следует рассматривать в комплексе. Силы пластического и вязкого сопротивления совместно препятствуют процессу уплотнения, но физическая их суть различна. Силы вязкого сопротивления уменьшают влияние сил сухого трения — цементное тесто выполняет роль смазки в процессах уплотнения. Это обстоятельство и предопределило изучение целым рядом исследователей сил вязкого сопротивления и снижения их значения при вибрационном воздействии.

В выражении (1.43) показано, что характер вибрационного процесса уплотнения определяется константами C_1 и C_2 . В этом случае при одних и тех же свойствах смеси уплотнение будет протекать по-разному: при больших амплитудах вибрации возникают большие относительные перемещения частиц и интенсивнее преодолеваются силы трения — пластического сопротивления при значительных частотах, благодаря большему тиксотропному разжижению цементного теста, — силы вязкого сопротивления. При воздействии низкочастотных режимов происходит менее интенсивное разжижение растворной составляющей. С другой стороны, большие амплитуды

литуды способствуют быстрейшему взаимному перемещению частиц и общий процесс уплотнения будет менее продолжительным.

Уплотнение функционально зависит от ускорения, которое и принято в качестве одного из основных факторов, определяющих этот процесс, что важно для машиностроительной отрасли. Чем меньшее значение ускорения в области рациональных частот и амплитуд позволит получить наиболее высокий эффект уплотнения, тем оптимальнее вибрационная система.

В связи с изложенными физическими особенностями процесса уплотнения представляется развитие следующих основных направлений вибрационной технологии:

использование симметричных и асимметричных низкочастотных режимов (частота ниже 30 Гц) как наиболее универсальных, позволяющих обеспечить уплотнение как жестких, так и весьма подвижных бетонных смесей;

внедрение управляемых режимов колебаний при различных частотах колебаний, направленности результирующих пространственных колебаний, пригруза и других режимов.

2. СИММЕТРИЧНЫЕ РЕЖИМЫ КОЛЕБАНИЙ И ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ВИБРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1. ВИБРАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ С СИММЕТРИЧНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ РАБОЧЕГО ОРГАНА

Основной вид формовочного оборудования при производстве железобетонных изделий и конструкций — виброплощадки. Наиболее распространены площадки конструкции Гипростроммаша. Они собираются из стандартных блоков, соединяемых с помощью карданных валов и синхронизаторов в единую систему. Виброплощадки имеют вертикально-направленные колебания с амплитудой 0,2...0,5 мм и частотой 50 Гц, или 3000 колебаний в 1 мин (рис. 2.1, табл. 2.1). Такие виброплощадки передают бетонной смеси ускорение до 5g и тем самым обеспечивают ее уплотнение жесткостью до 60 с.

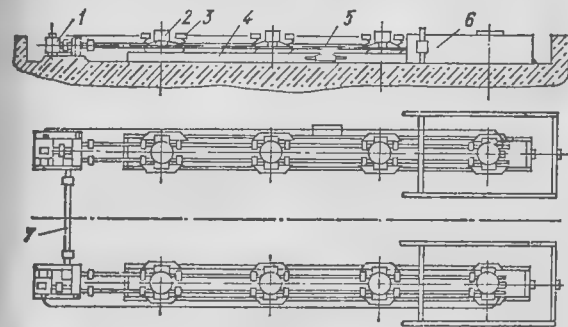


Рис. 2.1. Схема виброплощадки конструкции Гипростроммаша:

1 — привод; 2 — виброблок; 3 — пружинная опора; 4 — опорная рама; 5 — карданный вал; 6 — звукоизолирующий кожух; 7 — синхронизатор

Т а б л и ц а 2.1. Технические характеристики вибро

Показатель	СМЖ-187А	СМЖ-200Б
Номинальная грузоподъемность, т	10	15
Количество блоков	8	8
Суммарный статический момент, кг · м	37	45
Колебания рабочего органа	Вертикально	направ
Частота колебаний, Гц	50	50
Амплитуда колебаний, мм	0,2...0,5	0,2...0,5
Способ крепления формы	Электромагнитный	
Установленная мощность, кВт	60	88
Габариты, мм:		
длина	8500	10 260
ширина	2986	2986
высота	664	664
Общая масса, кг	6500	6950

Основной недостаток оборудования — необходимость синхронизации блоков. При этом возникают частые поломки валов и синхронизаторов, электромагнитов, что вызывает значительные эксплуатационные затраты. Эта схема приводит к повышенному расходу электроэнергии (до 5 кВт на 1 т грузоподъемности) и высокому уровню шума (до 110 дБА).

Одним из видов оборудования с пространственными симметричными колебаниями являются площадки, разработанные в Полтавском инже-

площадок Челябинского завода «Строммашина»

СМЖ-199А	СМЖ-164	СМЖ-198	СМЖ-111	СМЖ-460	СМЖ-633
24 16	40...56 14	15 2	20 2	15 1	18 4
60 лениные	74; 90; 120; 160	74	37; 54; 72	—	121
	Горизонтально	направле-	ные	Вертикально	направленные
				асимме-	ударно-
				тричные	вибра-
					ционные
50 0,2...0,5	50 0,2...0,5	42 0,4...0,6	40...50 0,4...0,6	9...11 2...8	25 0,8...1
		Гидрав-	Пневма-	Электро-	Без кре-
		личес-	тический	магнит-	пления
		кий	кий	ный	
120	234,5	22	19	30	8,8
15 070	18 900	8340	9676	5550	5900
3006	3040	3200	3206	2690	2800
664	720	1224	1133	1399	670
13 150	16 150	5400	6800	20 400	5440

нерно-строительном институте. Они работают при частоте 24 Гц и амплитуде колебаний в горизонтальной плоскости 0,5...1 мм, в вертикальной — 0,3...0,5 мм, используются для уплотнения малоподвижных и подвижных бетонных смесей [18].

На площадках рамной конструкции вибрация обеспечивается одним или двумя вибровозбудителями (рис. 2.2, табл. 2.2). Энергетические затраты составляют 1 кВт на 1 т грузоподъемности

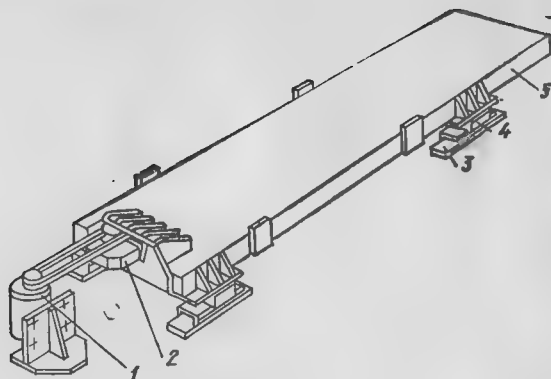


Рис. 2.2. Схема виброплощадки с многокомпонентными колебаниями конструкции Полтавского инженерно-строительного института:

1 — двигатель; 2 — вибровозбудитель с вертикальным валом;
3 — опорные элементы; 4 — упругие резино-металлические опоры; 5 — подвижная рама

Таблица 2.2. Технические характеристики

Показатели	ВП-2	ВПГ-1,5×6	ВПГ-10М2	ВО-10М	ВПГ-3×7М
Грузоподъемность, т	0,2...1	До 10	4...12	4...12	15
Установочная мощность, кВт	0,4...2	11	11	11	11
Масса площадки, кг	1440	4693	4500	4630	5300
Габариты, мм:					
длина	3500	6600	6700	4000	6700
ширина	1300	1600	1800	3300	3000
высота	730	—	—	—	—
Тип вибратора	ИВ-68	ВУ-10	ВУ-10	ВУ-10	ВУ-10
Количество, шт.: вибраторов	2	1	1	1	1
упругих опор	—	—	4	4	6
кулачковых механизмов	—	—	—	—	—

площадки, уровень шума более низкий по сравнению с серийным оборудованием.

Для уплотнения сверхжестких смесей целесообразно применять вибропрессы, на которых могут быть изготовлены мелкоштучные изделия типа тротуарных плит, стеновых блоков и др. (табл. 2.3).

На рис. 2.3 представлена принципиальная схема технологической линии с использованием вибропресса типа ВИП конструкции Научно-исследовательской лаборатории физико-химической механики и технологических процессов. Готовые изделия транспортером подаются в камеру тепловой обработки или в накопители. Формование осуществляется с помощью виброблока в форме с пневматическим пригрузом. Бетонная смесь дозируется мерным ящиком и на металлическом поддоне шаговым транспортером перемещается на пост виброуплотнения.

виброплощадок с многокомпонентными колебаниями

ВПГ-20	ВПК-25	ВПГ2×14М	ВО-25М	ВПГ-25М	ВПС-24	ВПГ-50	УВУ-8
До 20	До 25	10...25	10...25	10...25	10...25	20...60	2...10
17 4900	22 4600	30 8300	22 7300	30 7140	30 9100	60 14 400	11 5400
4250 2776 885	6600 2480	15 000 2000	4000 3000	8000 2900	11 600 3200	16 680 2800	6650 2400
ВУ-25	ВУ-25	ВУ-25	ВУ-25	ВУ-25	ВУ-25	ВУ-25	—
1	1	1	1	1	1	1	—
4	10	6	8	8	8	16	—
—	—	—	—	—	—	—	3

Т а б л и ц а 2.3. Основные показатели вибропрес-
сочного

Марка пресса	Номенклатура формируемых изделий	Схема формо- вания	Количество изде- лий за цикл
ВИП-4М	Плита тротуарная Плиты ПКП Фигурные элементы мощения То же	На поддоне То же » » » »	1...2 4 2 15
ВИП-5М	Плита тротуарная Трамвайная плита	Без поддона То же	1 1
ВИП-6М	Бортовые камни Газовые камни Тротуарные плиты Стеновые блоки	На поддоне То же На поддоне » »	2 10 22 8
ВИП-7	Бортовые камни Тюбинги Тротуарные плиты Камни бетонные сте- пные	На поддоне То же » » На поддоне	11 11 60 91
ВИП-8	Блоки стен-подвалов	То же	2
ВИП-9	Тротуарные плиты	» »	1
ВИП-10	Бортовые камни Газонные камни	» » » »	1 3
ВИП-10М	Бортовые камни Камни бетонные сте- пные	» » » »	1 2...6
ВИП-11	Плиты ПРТ	» »	2
ВИП-12	Камни бетонные сте- пные Газонные камни	» » » »	2...6 3

сочного оборудования для формирования изделий из
бетона

Объем изде- лий на 1 цикл		Мощность, кВт	Амплитуда, мм	Разовый цикл изго- товления, с	Масса пресса, т	Стоимость, тыс. р.
площадь, м²	длина, м					
0,48	—	6,0	1,2...1,5	20...25	7,15	25
0,108	2,4	6,0	1,2...1,5	20...25	7,15	25
0,4	—	6,0	1,2...1,5	25	7,5	30
0,54	—	6,0	1,2...1,5	25	7,5	30
0,25	—	3,0	1,0—1,2	16...20	7,39	16
0,26	—	3,0	1,0...1,2	20	7,5	17
0,6	2,0	10,0	1,0...1,2	20...30	14,5	25
2,0	6,0	10,0	1,0...1,2	20...30	14,5	26
3,0	—	10,0	1,0...1,2	20...30	14,5	28
1,6	—	10,0	1,0...1,2	20...30	14,5	28
3,3	11,0	20,0	1,5...2,0	30...45	14,8	30
0,396	—	20,0	1,5...2,0	30...45	14,8	30
7,5	—	50,0	1,5...2,0	30...45	15,0	32
3,64	—	20,0	1,5...2,0	30...45	15,0	33
2,76	4,8	77,0	1,5...2,0	85	40,0	35
0,09	—	1,5	1,0...1,2	15...20	1,28	3
0,3	1,0	1,5	1,2...1,4	20...25	3,0	6
0,6	3,0	1,5	1,2...1,4	20...25	3,0	6
0,3	1,0	1,5	1,2...1,4	20...25	3,0	6
0,324	—	1,5	1,2...1,4	20...25	3,0	6
1,6	—	22,0	1,0	45	13,0	10
0,324	—	1,5	1,2...1,5	20...25	—	—
—	3,0	1,5	1,2...1,5	20...25	2,5	5

Марка пресса	Номенклатура формуемых изделий	Схема формирования	Количество изделий за цикл
ВИП-12	Бортовые камни	На поддоне	1
	Плиты цокольные	То же	6
	Накрывные ремонтные камни	На поддоне	4...6

Примечание. Частота колебаний 50 Гц.

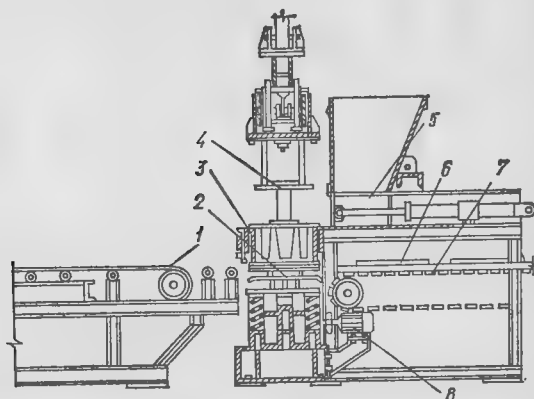


Рис. 2.3. Принципиальная схема вибропресса и участка технологической линии изготовления мелкоштучных изделий:

1, 7 — транспортерные ленты; 2 — виброблок; 3 — форма; 4 — пневматический пригруз; 5 — мерный ящик; 6 — металлический поддон; 8 — вибровозбудитель

Объем изделий на 1 цикл		Мощность, кВт	Амплитуда, мм	Разовый цикл изготовления, с	Масса пресса, т	Стоимость, тыс. р.
площадь, м ²	длина, м					
—	1,0	1,5	1,2...1,5	20...25	2,5	5
0,6	3,0	1,5	1,2...1,5	20...25	2,5	5
—	2,4	1,5	1,2...1,5	20...25	2,5	5

2.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА ВИБРОПЛОЩАДКАХ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Технологическую эффективность уплотнения бетонных смесей на виброплощадках типа ВПГ исследовали, используя портландцемент Балаклевского завода с нормальной густотой цементного теста 24,5 %, гранитный щебень фракций 5...10; 5...20; 10...20; 20...40 и Днепровский кварцевый песок с модулем крупности 1,1 (исследования выполнены канд. техн. наук В. В. Шульгиным). Подвижность смеси принята от 1 до 5 см осадки конуса. Составы подбирали так, чтобы доля песка составила 0,3...0,5, а водоцементное отношение — 0,5...0,7.

Режимы вибрационного уплотнения изучали при среднечастотной стандартной вибрации ($f = 50$ Гц) с ускорением $5g$ и низкочастотной — с частотой 24 Гц, вертикальным ускорением $A_g = 2,5g$, и горизонтальным — $A_g = 2,0g$.

Время уплотнения принято равным 3 мин. Отформованные образцы хранили 7 сут в нормальных условиях, а затем испытывали на одноосное сжатие (табл. 2.4).

Т а б л и ц а 2.4. Составы бетонных смесей и прочность образцов при различных режимах уплотнения

Расход в 1 м³ бетона				В/Ц	Доля песка	ОК, см	R _b , МПа, при частоте	
Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг				инькой	средней
380	190	550	1276	0,5	0,3	1	10,8	12,9
440	220	847	847	0,5	0,5	1	12,3	9,5
410	210	522	1217	0,5	0,3	5	11,2	15,5
460	230	825	825	0,5	0,5	5	15,0	14,1
271	190	579	1341	0,7	0,3	1	20,7	21,8
314	220	902	899	0,7	0,5	1	23,7	20,4
300	210	555	1287	0,7	0,3	5	20,1	22,4
329	230	882	880	0,7	0,5	5	26,2	23,3
400	200	882	1069	0,5	0,4	3	14,0	12,8
286	200	753	1127	0,7	0,4	3	24,3	26,6
317	190	753	1127	0,6	0,4	1	16,4	16,4
350	210	722	1077	0,6	0,4	5	18,8	19,2
313	190	564	1317	0,6	0,3	3	16,8	18,4
367	220	879	877	0,6	0,5	3	19,6	17,0
333	200	738	1101	0,6	0,4	3	19,2	18,8
295	195	664	1222	0,66	0,35	2	19,0	18,2
270 *	178	684	1265	0,66	0,35	7	19,0	18,0

* С добавлением суперпластификатора С-3 — 0,75 %.

Если нанести на одну координатную ось предел прочности, полученный при низкочастотном способе уплотнения, а на вторую — предел прочности при среднечастотном, то результирующая пройдет примерно под углом 45°. Однако низкочастотная имеет результирующую интенсивность 3,2g, а среднечастотная — 5g. Конечно,

энергетические затраты будут значительно ниже при низкочастотном режиме. Можно сделать вывод о достаточной технологической эффективности низкочастотного способа уплотнения для бетонных смесей с осадкой конуса 3...5 см.

Особый интерес представляет влияние «пристенного» эффекта на прочность бетона плитных изделий, уплотненных многокомпонентной вибрацией. Анализ эпюр распределения прочности бетона по фрагменту, приведенному на рис. 2.4,

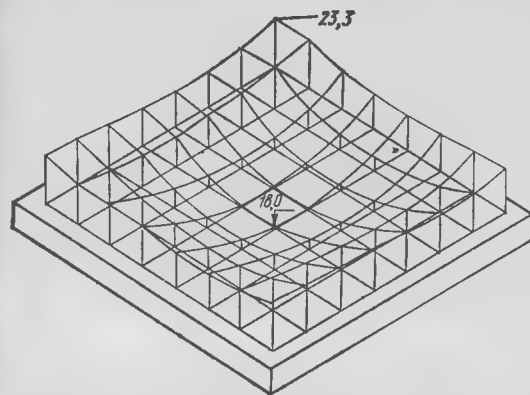


Рис. 2.4. Эпюры распределения амплитуд, мм, и прочности по фрагменту плиты размерами 100 × 100 см

свидетельствует о том, что влияние «пристенного» эффекта распространяется на расстояние 10...15 см, поскольку энергия у стенок от горизонтальной составляющей передается через малую площадь формы и не обеспечивает уплотнение по всей площади изделия. Чем подвижнее смесь и больше вертикальное ускорение, тем выше однородность распределения прочности бе-

тона. Таким образом, при уплотнении плитных изделий на виброплощадках с многокомпонентными колебаниями главный фактор, влияющий на распределение прочности бетона,— это вертикальное ускорение и равномерность его распределения по площади рамы. В площадках Полтавского инженерно-строительного института эта равномерность не всегда наблюдается, так как при галопировании обязательно должна возникнуть нейтральная ось, что снизит однородность уплотнения.

Низкочастотные площадки типа ВПГ получили широкое распространение на различных заводах страны (табл. 2.5). Особенно эффективно их применять при изготовлении объемных изделий (технологические исследования по эффективности низкочастотных режимов для объемных изделий типа СО выполнил под руководством авторов канд. техн. наук И. Е. Холмин). Объемные элементы для силосов собираются из блоков типа СО с размерами 3×3 м и высотой 1,17 м, которые должны отвечать следующим требованиям:

изготавливаться из тяжелого бетона, соответствующего по прочности на сжатие классу В25 (М300 и М350);

коэффициент вариации прочности бетона не должен превышать 11 %, а для элементов высшей категории качества — 9 %;

марка бетона по морозостойкости должна быть не ниже F75;

на поверхности не допускаются раковины диаметром более 6 мм и глубиной более 3 мм, местные наплывы и впадины глубиной более 3 мм, отколы бетона более 5 мм, жировые и ржавые пятна.

Очень широко распространены стационарные формы с навесными вибраторами (машинами общего назначения), характеристики которых представлены в табл. 2.6. Как правило, их устанавливают по два на каждую стенку форм и, как показало обследование предприятий, такое расположение приводит к неравномерности амплитуд, взаимному их гашению или усилению колебаний и, как следствие, к ускоренному износу вибраторов и отрыву от форм. Поэтому в конце 70-х годов такие изделия начали изготавливать, используя виброплощадки. Весьма удачной оказалась симметричная и особенно асимметричная вибрация на машинах типа ВРА (СМ)Ж-460), которые будут рассмотрены ниже. Низкая частота (около 15 Гц) обеспечивает однородность уплотнения изделий по высоте, что подробно рассматривалось в гл. 1. Наиболее эффективным оказалось изготовление таких элементов на площадках типа ВПГ (ВО-10 М).

Для обеспечения работы этих площадок выполнен значительный комплекс исследований на цементах марки 400 Воскресенского (НГ = 28,75 %) и той же марки Михайловского заводов (НГ = 25,25 %). Удобоукладываемость принята от 40 с жесткости по техническому вискозиметру до 12 см осадки конуса.

При этом использовалась добавка С-3 для доведения удобоукладываемости до 20 см. Основные составы бетонной смеси приведены в табл. 2.7.

Как следует из табл. 2.8, бетонные смеси жесткостью 20 с и более подвижные лучше уплотнять при низкочастотных режимах. При этом коэффициент повышения прочности при ОК = 12 см составит 1,23.. 1,25, что говорит о высокой эффективности низкочастотных методов.

Т а б л и ц а 2.5. Технологические

Завод	Вид оборудова- ния	Тип изделия	Класс бетона	Осадка конуса, см
ПО «Кре- менчугжеле- зобетон», ЖБИ-1	ВПГ-2×14М, ВПС-20, ВПГ 1,5-12	Плиты по- крытия	B25	2...3
		Дорожные плиты	B25	2...3
		Сваи	B25	4...6
		Колонны	B30	4...6
То же, ЖБИ-2	То же ВПГ 1,5×6	Плиты пе- рекрытий	B25	2...3
		Перемычки, ригели, шпалы	B25	4...6
То же, ЖБИ-4	ВПГ-3×7, ВПС-14	Плиты пе- рекрытий	B25	4...6
		Сваи	B25	1...3
		Ригели	B30	4...6
			B30	4...6
ПО «Днеп- роэнерго- стройпром», головной за- вод ЖБИ, Святошино	ВПГ-2×14М, ВПГ-3×7	Плиты реб- ристые	B15	3...5
		Сваи	B20	3...5
		Виброопоры	B30	3...5
		Колонны	B40	3...5
	ВПГ-1,5×6, ВПГ-3×7	Брусковые элементы	B15	0,5
		Стеновые панели	B5	0,5...1
		То же ке- рамзитобе- тонные	B7,5	2...3
		Тротуар- ные плиты	B25	1...3
	ВПГ-1,5×6	Пустотные плиты	B15	1...3
		Свая	B25	1...3

показатели виброплощадок типа ВПГ

Время уплотне- ния, мм	Расход на 1 м³ бетона				
	Ц, кг	П, кг	Щ, кг	В, л	Д, кг
2...3	309	620	1335	152	2,1
2...3	400	350	1325	158	2,8 (УПБ)
2...3	380	550	926	166	3,0
2...3	500	620	1312	163	3,1
2...3	330	640	1366	143	—
2...3	370	550	1293	180	—
2...3	385	560	1345	151	6,0
2...3	300	470	1336	160	8
2...3	437	490	1300	170	8
2...3	270	700	1250	170	0,2
2...3	385	535	1250	175	—
2...3	470	570	1780	180	0,2
2...3	565	375	1230	185	0,2
2...3	250	690	1347	147	0,5
3...5	250	590	300	400	275
3...5	200	435	—	632	256
1,5	360	635	1240	185	—
3	322	620	1305	175	—
3	453	470	1334	165	8

Т а б л и ц а 2.6. Технические характе

Марка вибро-	Частота колебаний, Гц	Вынуждающая сила, Н	Мощность, Вт
--------------	-----------------------	---------------------	--------------

С круговыми

ИБ-96	50	17 000...34 000	1500
ИБ-98	50	5700...11 500	550
ИБ-99	50	2300...4600	250
ИБ-104	25	3100...6250	370
ИБ-105	25	12 500...25 000	1100
ИБ-106	25	6200...12 500	750
ИБ-107	50	10 000...20 000	1100
ИБ-111	100	2800...5600	550

С направленными

ИБ-101	50	2300...4600	250
--------	----	-------------	-----

Т а б л и ц а 2.7. Составы бетонных смесей

Расход на 1 м³ бетона				Добавка С-3, % массы цемента	Доля песка в смеси заполнителей	Удобукладываемость бетонной смеси	
Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг			Ж, с	ОК, см
314	157	770	1154	—	0,4	40	—
336	168	752	1125	—	0,4	20	—
350	175	747	1121	—	0,4	—	2
368	184	724	1086	—	0,4	—	4
402	201	694	1042	—	0,4	—	7
432	216	668	1003	—	0,4	—	12
424	212	934	764	—	0,55	—	2
424	212	764	934	—	0,45	—	7
424	212	594	1104	—	0,35	—	12
368	184	724	1086	0,3	0,4	—	10

Примечание Жесткость бетонной смеси определяли по техническому вискозиметру.

ристики вибромашин общего назначения

Номинальное напряжение, В	Габариты, мм			Масса, кг
	длина	ширина	высота	

колебаниями

380	585	380	335	110
36/380	390	240	250	23
36/380	330	194	200	14
40/380	438	240	250	29,5
380	565	345	320	90
380	535	280	290	52
380	460	280	200	44
127/220	325	190	200	12,4

колебаниями

36/380	330	191	331	18,5
--------	-----	-----	-----	------

Один из значимых факторов — расслаиваемость бетонных смесей, а именно при формировании крупноразмерных изделий в вертикальном положении. При этом основное влияние на расслаиваемость оказывают режимы колебаний (частота, ускорение, направленность вибрации) и составы бетонных смесей (подвижность и доля песка в смеси заполнителей). Подвижность приняли по осадке конуса в пределах 2...12 см, а долю песка в смеси заполнителей — 0,35...0,55.

Расслаиваемость определяли по показателю раствооротделения, полученного способом мокрого отсева на призмах размерами 10 × 10 × 40 см. После изготовления их распиливали на кубы размерами 10 × 10 × 10 см и испытывали на прочность при сжатии (табл. 2.9).

На рис. 2.5 представлена зависимость между показателем раствооротделения P_p и коэффициентом вариации прочности бетона V_R . С увеличе-

Т а б л и ц а 2.8. Определение рациональных режимов уплотнения

Время уплотнения, с	Ускорение, м/с²/g		Прочность бетона при частоте вибрации, Гц		$K = \frac{R_{сж}^{25}}{R_{сж}^{50}}$
	горизонтальное	вертикальное	25	50	

Осадка конуса 12 см

160	35/3,5	25/2,5	35,8	29,0	1,23
160	35/3,5	5/0,5	35,4	28,4	1,25
	15/1,5	25/2,5	31,9	25,7	1,24
160	15/1,5	5/0,5	31,7	28,2	1,12
160	25/2,5	15/1,5	32,6	31,2	1,04
100	35/3,5	25/2,5	31,5	27,4	1,14
100	35/3,5	5/0,5	31,3	26,8	1,17
40	15/1,5	25/2,5	30,2	24,1	1,25
40	15/1,5	5/0,5	30,1	23,5	1,28

Жесткость 20 с

160	25/2,5	15/1,5	36,0	35,3	1,02
160	35/3,5	15/1,5	36,3	35,5	1,02
160	15/1,5	15/1,5	30,7	30,6	1,01
100	25/2,5	25/2,5	35,4	34,3	1,03
100	25/2,5	5/0,5	36,1	33,7	1,04
40	25/2,5	15/1,5	32,3	29,9	1,08

Жесткость 40 с

160	35/3,5	25/2,5	35,7	39,2	0,91
160	35/3,5	5/0,5	35,5	38,6	0,92
160	15/1,5	25/2,5	25,6	32,6	0,79
160	15/1,5	5/0,5	25,4	32,1	0,79
100	25/2,5	15/1,5	36,5	36,0	1,01
100	35/3,5	25/2,5	30,1	32,9	0,91
100	35/3,5	5/0,5	29,9	32,3	0,93
40	15/1,5	25/2,5	22,4	23,5	0,95
40	15/1,5	5/0,5	22,4	22,8	0,98

нием раствооротделения с 1,5 до 5 % коэффициент вариации прочности возрастает с 4,5 до 9,8 % (линии 1—I' и 1—I''), а с 3 до 9 % — V_R изменяется от 7 до 15,5 %. Из данных экспери-

Т а б л и ц а 2.9. Расслаиваемость бетонных смесей при частоте вибрации 25 Гц

Виброускорение, м/с²/g	Время уплотнения, с	Π_p , %	V_R , %
------------------------	---------------------	-------------	-----------

Осадка конуса 2...5 см

$A_T = 25/2,5$	30	1,1	2,4
$A_B = 15/1,5$	60	3,4	7,2
	90	5,1	7,4
$A_T = 35/3,5$	30	1,2	2,1
$A_B = 15/1,5$	60	3,9	5,3
	90	5,8	6,0
$A_T = 25/2,5$	30	1,5	3,6
$A_B = 25/2,5$	60	5,4	4,7
	90	7,9	9,9
$A_T = 35/3,5$	30	2,0	5,0
$A_B = 25/2,5$	60	5,7	5,3
	90	8,1	8,1

Осадка конуса 5...8 см

$A_T = 25/2,5$	30	2,0	4,3
$A_B = 15/1,5$	60	5,5	6,0
	90	7,6	10,2
$A_T = 35/3,5$	30	2,4	3,2
$A_B = 15/1,5$	60	5,8	9,8
	90	8,3	14,3
$A_T = 25/2,5$	30	3,1	4,7
$A_B = 25/2,5$	60	7,7	10,2
	90	9,8	11,1
$A_T = 35/3,5$	30	3,7	5,6
$A_B = 25/2,5$	60	8,0	7,4
	90	10,9	9,7

Осадка конуса 8...12 см

$A_T = 25/2,5$	30	3,5	7,1
$A_B = 15/1,5$	60	7,2	9,8
	90	9,1	15,2
$A_T = 35/3,5$	30	4,2	6,8
$A_B = 15/1,5$	60	8,1	7,4
	90	10,3	7,9
$A_T = 25/2,5$	30	5,6	6,4
$A_B = 25/2,5$	60	9,9	8,3
	90	11,7	9,8

Продолжение табл. 2.9

Виброускорение, м/с ² /g	Время уплотнения, с	Π_p , %	V_R , %
$A_p = 35/3,5$	30	5,8	9,3
$A_B = 25/2,5$	60	10,5	12,4
	90	13,3	15,6

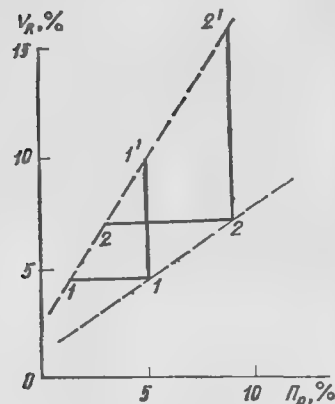


Рис. 2.5. Зависимости между раствооротделением и вариацией прочности бетона

ментов следует, что при увеличении значения вертикального виброускорения на 1g показатель раствооротделения увеличивается на 4...6 %, а аналогичное увеличение горизонтального ускорения — всего на 2...4 %. Это обстоятельство особенно важно в пластифицированных бетонных смесях (см. § 2.3).

При определении влияния режимов уплотнения и составов бетонной смеси на пористость и морозостойкость бетона в качестве варьируемых параметров приняты горизонтальная составляющая ускорения $A_{гг}$ в пределах от 1,5 до 3,5g,

доля песка в смеси заполнителей, равная 0,35... 0,55, время уплотнения — от 30 до 90 с, $B/C = 0,5$. Подвижность (от 2 до 12 см) обеспечивалась за счет изменения доли песка в смеси заполнителей. Пористость открытую Π_o и условно замкнутую Π_u устанавливали по значению водопоглощения при различных режимах испытания. Морозостойкость бетона определяли ускоренным методом замораживания при -50°C и проверяли после 30 циклов, что соответствует F200 (табл. 2.10).

Таблица 2.10. Влияние режимов вибрации на пористость и морозостойкость

Виброускорение, м/с ² /g	Время уплотнения, с	Доля песка в смеси заполнителей	Пористость и морозостойкость бетона при частоте вибрации 25/60 Гц			K_F^{25} K_F^{50}
			Π_p , %	Π_u , %	Коэффициент морозостойкости K_F	
15/1,5	30	0,35	12,9/14,5	1,7/2,1	0,84/0,83	1,01
	30	0,55	12,0/13,7	2,2/2,6	0,93/0,9	1,03
	60	0,45	12,7/13,6	1,7/2,0	0,86/0,8	1,08
	90	0,55	12,7/14,4	2,2/3,1	0,89/0,86	1,03
	90	0,35	13,1/17,0	2,1/3,1	0,87/0,82	1,06
25/2,5	90	0,45	12,1/12,6	1,8/2,2	0,92/0,9	1,02
	60	0,55	11,9/12,5	1,9/1,9	0,93/0,87	1,07
	60	0,45	12,2/12,6	1,6/1,7	0,89/0,85	1,05
	60	0,45	12,6/12,4	1,5/1,7	0,86/0,86	1,0
	60	0,45	12,1/12,5	1,6/1,8	0,9/0,91	0,99
	60	0,35	12,5/13,1	1,4/1,6	0,85/0,83	1,02
	90	0,45	12,2/12,6	1,8/2,2	0,92/0,93	0,99
25/3,5	30	0,35	12,1/17,3	1,8/2,9	0,91/0,78	1,17
	30	0,55	11,9/14,2	2,3/3,2	0,95/0,86	1,09
	60	0,45	11,8/12,3	1,8/1,9	0,93/0,9	1,03
	90	0,55	10,5/11,8	2,1/2,2	0,98/0,97	1,01
	90	0,35	11,0/12,9	1,5/1,9	0,86/0,90	1,0

Увеличение доли песка в смеси заполнителей приводит к уменьшению открытой пористости на 0,5...1,2 % и к некоторому увеличению условно-замкнутой пористости (0,2...0,5 %) как при низко-, так и при среднечастотных режимах. Таким образом, переход от подвижных ($ОК = 12$ см) к малоподвижным ($ОК = 2$ см) смесям способствует улучшению поровой структуры. Большое влияние на пористость бетона имеет ускорение колебаний и время вибрации. Особенно оно значимо при частоте 50 Гц, что свидетельствует о меньшей технологической устойчивости режима. Следует отметить повышенную морозостойкость бетона, уплотненного низкочастотными режимами по сравнению со среднечастотными.

В зависимости от количества добавки в условиях различных режимов вибрации значительно меняются значения раствороотделения и морозостойкости. При сохранении подвижности на уровне $ОК = 4...5$ см ускорение принято $A_{gr} = 2,5g$ и $A_{gv} = 0,5...1g$, время уплотнения — 90 с (рис. 2.6). Низкая частота, вызывая меньшую тиксотропию бетонных смесей, в 1,5...2 раза уменьшает раствороотделение. Но возможность эффективной переупаковки крупных частиц при низкой частоте и малой вязкости растворной составляющей обеспечивает дополнительное уплотнение смеси и существенно повышает морозостойкость.

Один из положительных моментов в применении вибрации с многокомпонентным режимом — обеспечение высокого качества поверхности изделий. Его оценивали в процентах по площади пор, приходящихся на единицу поверхности раз-

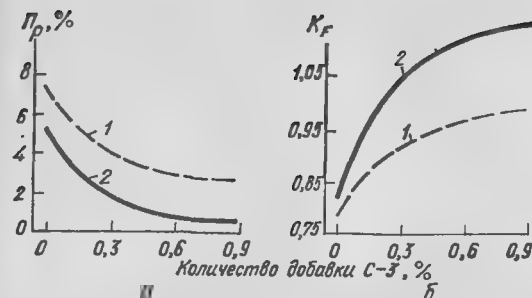


Рис. 2.6. Влияние добавки С-3 на раствороотделение и морозостойкость бетонов:

1 — $f = 50$ Гц; 2 — $f = 25$ Гц

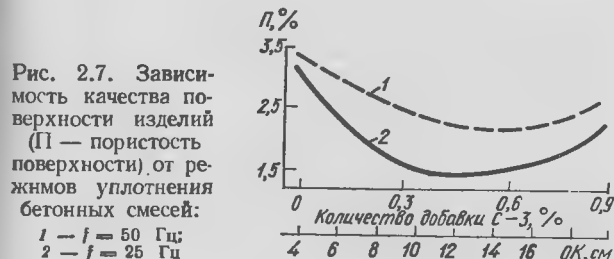


Рис. 2.7. Зависимость качества поверхности изделий (П — пористость поверхности) от режимов уплотнения бетонных смесей:

1 — $f = 50$ Гц;
2 — $f = 25$ Гц

принята 2...12 см, время уплотнения — 30...90 с, ускорение — 1,5...3,5g. Наилучшее качество поверхности обеспечивается низкочастотными режимами колебаний при подвижности 10...14 см осадки конуса и вертикальной составляющей (рис. 2.7). На рис. 2.8 показаны образцы поверхности бетона, изготовленного из бетонных смесей с $ОК = 12$ см при низко- и среднечастотных режимах уплотнения.

Высокие показатели физико-механических свойств бетона обеспечиваются равномерностью амплитудного поля (в данном случае по высоте

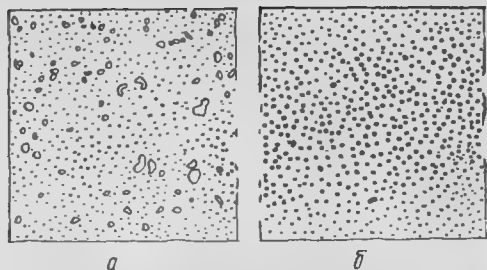


Рис. 2.8. Качество поверхности бетонных образцов при различных режимах вибрации:
а — среднечастотное $f = 60$ Гц; б — низкочастотное уплотнение $f = 25$ Гц

изделия). Она обеспечивается в зависимости от высоты установки вибровозбудителя. Объемные элементы типа СО на Агбасарском заводе ЖБК традиционно изготавливались с использованием навесных вибраторов из бетонной смеси подвижностью 12...14 см с расходом цемента 467 кг. Равномерность амплитудного поля площадки по высоте изделия достигали, изменяя высоту крепления возбудителя (рис. 2.9). Условия, представленные кривой 1, обеспечивают получение изделий высокого качества.

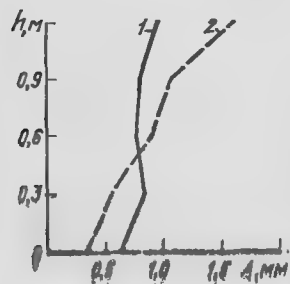


Рис. 2.9. Распределение амплитуд перемещений на различных уровнях по высоте объемного блока:

1, 2 — высота установки вибровозбудителя
0,44 и 0,18 — соответствующие

Применение площадки ВО-10М позволило уменьшить осадку конуса до 1...3 см и снизить расход цемента на 40 кг.

Расчет экономической эффективности показал, что использование данной технологии повышает производительность линии на 20...30 %, снижает металлоемкость оснастки и форм в 1,5...1,8 раза, трудозатраты — на 0,68 чел.-ч/м³. Общий экономический эффект при изготовлении 1 м³ изделия составляет 4,63 р.

Таким образом, применение низкочастотной технологии с пространственными колебаниями для изготовления объемных элементов имеет высокую технико-экономическую эффективность. Кроме того, использование таких режимов позволяет снизить уровень шума на 10...15 дБА и обеспечивает социальную привлекательность труда.

1.3. ВЕРТИКАЛЬНАЯ

СИММЕТРИЧНАЯ ВИБРАЦИЯ

С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОБАВОК СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ

Процесс уплотнения при вертикальных симметричных колебаниях изучали, используя бетонные смеси с осадкой конуса от 0 до 20 см на цементе Воскресенского завода активностью 43,2 МПа, нормальной густотой цементного теста 26,25 % (исследования выполнены канд. техн. наук К. В. Черных). В качестве заполнителей служили: гранитный щебень фракций 5...10 см, песок кварцевый Тучковского карьера с модулем крупности 1,58. Составы подобраны с В/Ц = 0,5, а подвижность обеспечивалась за счет введения до 1 % добавки С-3 (табл. 2.11).

Таблица 2.11. Составы подвижных бетонных смесей

Номер состава	Расход на 1 м³ бетона					ОК, см
	Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг	С-3, % массы цемента	
1	340	170	845	1050	0	0
2	340	170	845	1050	0,25	2
3	340	170	845	1050	0,5	7
4	340	170	845	1050	0,75	12
5	340	170	845	1050	1,0	20

Из бетонных смесей формовали образцы размерами $10 \times 10 \times 10$, которые испытывали в возрасте 7 сут в нормальных условиях. Режимы колебаний осуществляли на стенде ВЭДС-400 А в частотном диапазоне 10...50 Гц с ускорением 1...5g. Анализ зависимостей $R_0 = f(A\omega^2)$ показывает, что для получения бетона максимальной прочности для низкочастотных режимов необходимое значение ускорения можно принять равным 2,5g, а минимальное — всего 1...1,5g (рис. 2.10,

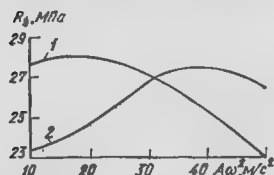


Рис. 2.10. Зависимость предела прочности от ускорения при различных режимах:

1 — $f = 10...25$ Гц; 2 — $f = 50$ Гц

кривая 1). Для среднечастотного режима достаточно ускорение, равное 3,5g, при этом прочность составляет 27,3 МПа (кривая 2).

Определение благоприятных условий вибрирования подвижных бетонных смесей с добавкой суперпластификатора С-3 связано не только с

частотой, но и с продолжительностью вибрирования. Процесс уплотнения во времени изучали для ускорения 2,5g. В эксперименте приняты весьма подвижные бетонные смеси с ОК = 11...13 см (состав 4, табл. 2.11). Анализ кривых 1...4 (рис. 2.11) показал, что время уплотнения

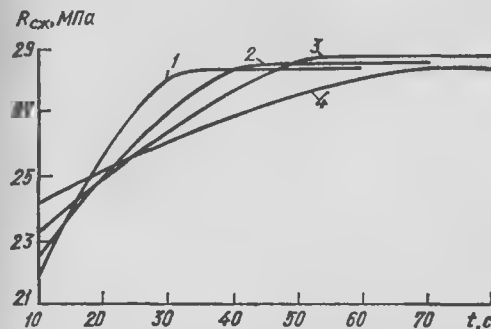


Рис. 2.11. Влияние времени вибрирования на прочность бетонных образцов при уплотнении весьма подвижных смесей с ускорением колебаний 2,5g:

1 — $f = 10$ Гц; 2 — $f = 15$ Гц; 3 — $f = 25$ Гц; 4 — $f = 50$ Гц

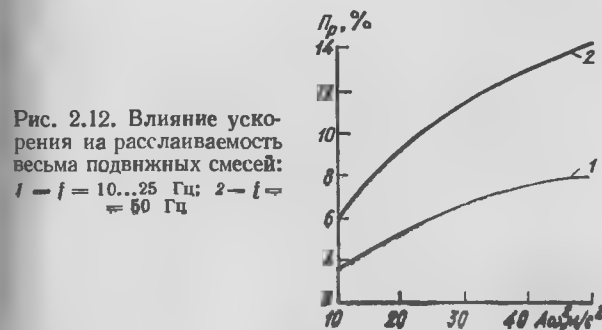


Рис. 2.12. Влияние ускорения на раскраиваемость весьма подвижных смесей:

1 — $f = 10...25$ Гц; 2 — $f = 50$ Гц

при низких частотах в 1,5...2 раза меньше по сравнению с частотой 50 Гц.

Задачу оптимизации частоты и ограничения ускорения колебаний весьма подвижных смесей целесообразно решать с учетом расслаиваемости смесей при различных режимах вибрирования. Показатель раствооротделения для низких частот в 1,5...2 раза ниже, чем при средних частотах (рис. 2.12). Коэффициент расслаиваемости при одних и тех же значениях подвижности уменьшается при использовании суперпластифицирующей добавки, особенно в диапазоне низких частот.

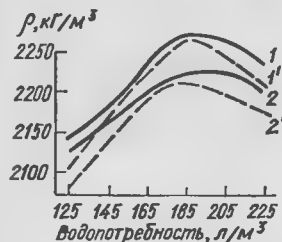
2.4. УПЛОТНЕНИЕ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ

Мелкозернистые песчаные бетонные смеси не поддаются эффективному уплотнению при обычных режимах вибрации. Как уже отмечалось в гл. 1, очевидно, для этой цели необходима повышенная частота. В лаборатории НИИЖБа выполнены исследования свойств мелкозернистых бетонных смесей при обычных режимах вибрации. Для этой цели измеряли предельное напряжение сдвигу (τ_0) по силе выдергивания рифленной пластины. Для песчаных бетонных смесей, уплотненных при частотах 0...50 Гц, τ_0 составило 2...5 кПа. Естественно, при таком значении τ_0 уплотнить бетонную смесь, в которой массовые силы частиц не смогут преодолеть сил сцепления, не удастся при обычных режимах вибрации. Для интенсификации режима широко применяется давление пригруза, значение которого требует оптимизации. Однако необходимо уточнить исходную влажность или водопотребность бетонной смеси.

Параграф написан канд. техн. наук Т. В. Грибковым,

Для ориентировочного определения влажности использован ударник Союздорнии, с помощью которого песчаные бетонные смеси уплотняются в металлическом стакане диаметром 100 мм, высотой 127 мм с дополнительной насадкой 60 мм. Уплотняли в три слоя, число ударов по каждому — 10...60. Масса ударника 2,5 кг, высота падения 30 см. При расходе цемента 450 и 600 кг/м³ для получения бетона предельной плотности потребовалось 185...195 л воды (рис. 2.13).

Рис. 2.13. Зависимость плотности мелкозернистых бетонных смесей от водопотребности (сплошной линией показано уплотнение трамбованием, пунктиром — вибропрессованием при $f = 50$ Гц, $A\omega^2 = 5g$ и $F = 8$ кПа); 1, 2, 1', 2' — расход цемента соответственно составил 600 и 450 кг на 1 м³ бетона



Экспериментально установлены оптимальные режимы уплотнения: частота 25...75 Гц, ускорение 5g и давление 80 кПа (табл. 2.12). Эти режимы были использованы при проектировании оборудования для изготовления тротуарных плит методом вибропрессования. В производственном объединении «Прикарпатжелезобетон» Минстроя УССР успешно работает такая линия (рис. 2.14). Она имеет следующие основные узлы: подачи и дозировки смеси; формования изделий; перегрузки готовой продукции на поддоны.

Узел подачи и дозировки бетонной смеси состоит из приемного бункера с вибратором, транспортера, подающего бетонную смесь в дозирующее устройство, и дозирующего устройства. Ос-

Т а б л и ц а 2.12. Определение рациональных режимов уплотнения

Расход на 1 м³ бетона, кг		Влажность W , %	Режимы			$R_{сж}$, МПа
Ц	П		частота, Гц	ускорение, g	давление, кПа	
300	1650	8	25	5,0	60	24,6
			50	5,0	80	24,4
			75	5,0	80	23,2
450	1650	8...9	25	5,0	60	36,0
			50	5,0	80	40,9
			75	5,0	90	30,3
600	1650	8...9	25	5,0	80	41,7
			10	50	80	50,5
			10	75	90	46,6

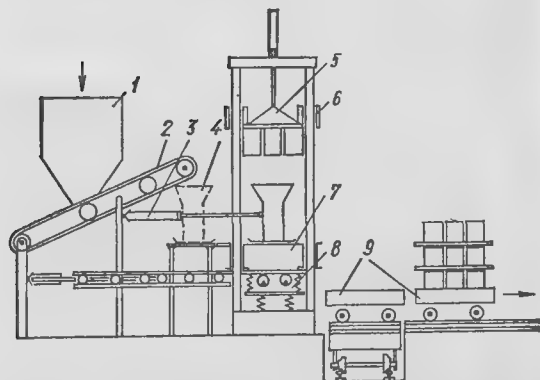


Рис. 2.14. Технологическая линия по изготовлению тротуарных плит методом вибропрессования:

1 — расходный бункер-накопитель; 2 — транспортер; 3 — телескопическая штанга; 4 — дозирующее устройство; 5 — пуансоны; 6 — направляющие; 7 — форма; 8 — виброплощадка; 9 — тележки

новным агрегатом служит вибропресс, включающий виброплощадку, оснащенную двумя вибраторами ИВ-107, форму-раму на 21 изделие и пригруза с 21 плунжером. Пригруз и форма свободно перемещаются с помощью гидравлической системы по направляющим рамы пресса. Амплитуда колебаний без загрузки пресса составляет 1 мм, при загрузке — 0,5...0,6 мм. Частота колебаний — 50 Гц. Прессующее усилие может меняться от 20 до 50 кН. При суммарной площади плунжеров, равной 4200 см², давление пригруза составляет 48...120 кПа. Тротуарные плиты имеют квадратное сечение 200 × 200 мм и толщину 100 мм. Для изготовления изделий применяется портландцемент Ямницкого завода М400, песок кварцевый речной Лимницкого месторождения с модулем крупности $M_{кр} = 2...2,5$ и песок кварцевый речной Рогатинского месторождения с модулем крупности $M_{кр} = 1,3...1,5$. Состав бетона: цемент — 530 кг, вода — 170 л, песок Лимницкий — 1200 кг, песок Рогатинский — 500 кг.

Вначале тротуарные плиты формовали по следующей схеме. Песчаный бетон подавался в дозирующее устройство, затем — в бункер-раздатчик, который при возвратно-поступательных движениях заполнял форму. Так как высота формы оказалась меньше необходимой для получения требуемой высоты изделия, то после первого заполнения формы на 1...1,5 с включались вибраторы, смесь оседала и затем ее досыпали в форму. После этого пригруз опускался, и снова включали вибраторы. Предварительное включение вибраторов на 1...1,5 с для оседания смеси и заполнения его формы недостаточно подготавливало бетонную смесь к уплотнению, что

подтвердила и низкая плотность изделий, отформованных по данному способу.

Процесс вибропрессования предложено рассматривать как двухстадийный. На I стадии (переупаковки составляющих) за счет перемещения частиц образуется новая более плотная структура, что позволяет более качественно уплотнить смесь на II стадии (доуплотнение), где совмещается переупаковка, тиксотропное разжижение и виброуплотнение цементного теста.

Выполнен производственный эксперимент, в котором после загрузки формы бетонной смесью ее уплотняли в течение 1, 3, 5, 7, 9 с, затем опускали пригруз и продолжали уплотнять еще 30 с. После формования образцы взвешивали, измеряли их геометрические размеры и подсчитывали значения плотности материала.

Влияние времени подготовки смеси на плотность материала:

Время предварительной подготовки смеси, с	1	3	5	7	9
Плотность свежеотформованных изделий, г/см ³	2,015	2,032	2,069	2,098	2,090

По результатам эксперимента можно сделать выводы о том, что предварительная подготовка смеси — обязательна и должна продолжаться 5...7 с. Об оптимальном времени формования на II стадии можно судить по осадке пригруза. После 20 с начинается стабилизация процесса, поэтому для уплотнения достаточно 30 с. Недостаточное давление приводит к недоуплотнению

смеси, избыточное — к заклиниванию или к заземлению воздуха в ней. Поэтому важно определить оптимальный пригруз в производственных условиях. С этой целью были сделаны замеры, в которых давление в системе менялось дискретно, через 1 МПа: 1, 2, 3, 4 и 5 МПа. Качество контролировали по свежеотформованным изделиям и по изделиям, прошедшим термовлажностную обработку.

Влияние давления пригруза на качество уплотнения бетонной смеси:

Давление в системе, МПа	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Плотность свежеотформованных изделий, г/см ³	2,019	2,078	2,160	2,108	1,960
Плотность изделий после термовлажностной обработки, г/см ³	2,000	2,07	2,12	2,08	1,95

Результаты эксперимента показывают, что оптимальным нужно считать давление в 3 МПа.

3. АСИММЕТРИЧНЫЕ УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ КОЛЕБАНИЙ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ВИДЫ ОБОРУДОВАНИЯ

3.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАРНО-ВИБРАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ

В условиях асимметричных режимов можно обеспечить технологическую эффективность: высокую скорость процесса и возможность уплотнения жестких бетонных смесей. Экспериментальные исследования выполнены на портландцементе Ново-Амвросиевского завода марки 500 с расходом цемента от 360 до 600 кг/м³, жесткость бетонной смеси изменялась от 20 до 100 с. Водоцементное отношение было принято равным 0,35.

Рассмотрим зависимость прочности при различных значениях ускорений (A_{gv} — ускорение при положении площадки в верхнем положении; A_{gn} — ускорение при положении площадки в нижнем положении). Влияние «верхнего» ускорения при асимметрии $A_{gn}/A_{gv} = 2...4$ более значимо, так как оно как бы подготавливает частицы для дальнейшего уплотнения их в момент соударения, и действия «нижнего» уплотняющего ускорения. Зависимости получены при ударно-вибрационном режиме с частотой $f = 10$ Гц (рис. 3.1).

При уплотнении бетонной смеси жесткостью до 40 с при ударно-вибрационном режиме $f = 10$ Гц, $A_{gv} = 3$ g, $A_{gn} = 10$ g наряду с более высокими прочностными показателями следует отметить меньшие значения пористости (рис. 3.2). Линия I, проходит под углом 45°, что свидетельствует

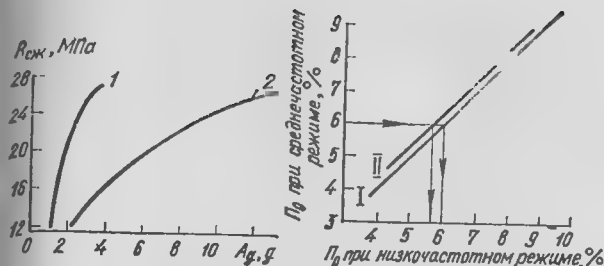


Рис. 3.1. Зависимость прочности бетона от ускорения вибрации:

1 — «верхнее» ускорение A_{gv} , g; 2 — «нижнее» ускорение A_{gn} , g

Рис. 3.2. Зависимость пористости по водопоглощению при различных режимах вибрации:

I, II — области бетонных смесей удобоукладываемостью соответственно выше 40 с и до 40 с по техническому вискозиметру

об одинаковой степени уплотнения ударно-вибрационного и стандартного ($f = 50$ Гц, $A_g = 3,5$ g). Пористость бетонов, уплотненных при низкочастотных асимметричных режимах, ниже по сравнению со стандартными (линия II).

Поверхностно-активные добавки типа СДБ значительно влияют на пластификацию бетонных смесей при различных режимах вибрации. При низкочастотных асимметричных режимах эффект пластификации проявляется более интенсивно. Причем количество добавки может быть уменьшено при использовании низких частот.

В условиях асимметричных режимов в 1,5 раза улучшается качество нижних поверхностей изделий и поры составляют всего 0,25 % нижней поверхности.

Эффективность низкочастотных режимов подтверждают эксперименты, проведенные канд.

техн. наук Г. К. Чихладзе для системы площадки с упругой прокладкой между формой и вибростолом. Использовались цемент Воскресенского завода активностью 47,5 МПа с нормальной густотой 26,25 %, гранитный щебень фракции 5...15 мм, кварцевый песок Тучковского карьера с модулем крупности $M_{кр} = 1,6$ (табл. 3.1).

Т а б л и ц а 3.1. Составы бетонных смесей

Расход на 1 м³ бетона				Удобоукладываемость	
Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг	Ж, кг	ОК, см
320	160	698	1200	60	—
340	170	668	1188	40	—
370	185	660	1180	20	—
400	200	645	1170	—	5...6

Т а б л и ц а 3.2. Влияние режима колебаний

Жесткость бетонных смесей, е	Режимы формования		
	$f, \text{ Гц}$	ускорение	
		$A_{гв}, \text{ г}$	$A_{гн}, \text{ г}$
20	15	2...2,5	6...8
	25	2...2,5	6
	35	2...2,5	6
40	15	2,5	8
	25	2,5...3,0	6...8
	35	2,5...3,0	6
60	15	2,5...3	8
	25	3	6...8
	35	3	6...8

Режимы формования бетонных смесей приняты из условия соударения между формой и площадкой через упругие прокладки — в каждом цикле удар. В табл. 3.2 представлены режимы формования и максимальные значения предела прочности при сжатии через 28 сут. Максимальная прочность получена при частоте 25 Гц. Асимметричные режимы с ускорением $A_{гн} = 6...8 \text{ г}$ обеспечивают уплотнение бетонных смесей жесткостью 60 с по техническому вискозиметру

Улучшение качества поверхностей связано с более низкими частотами, что позволяет воздушным включениям эффективнее мигрировать за пределы зоны контакта с формой. Более низкие частоты при одинаковых значениях верхнего и нижнего ускорений позволяют получить поверхность (особенно нижнюю) высокого качества с площадью пор 0,3...0,6 %.

на прочность бетона и качество поверхности

$R_{сж}, \text{ МПа}$	Средняя площадь пор от площади поверхности, %	
	Боковые	Нижняя
29,5...30	0,85...0,68	0,3...0,22
31,5	1,15...1,0	0,6...0,4
30,2	—	—
31,5	1,0	0,35
32,8...32,6	1,38...1,32	0,55...0,5
31,6	—	—
31,8	1,30	0,6
32,2...32,8	1,65	0,68
31,2...31,8	—	—

При снижении жесткости бетонных смесей достигается более низкая пористость поверхности, однако для частоты 10 Гц значение поверхностной пористости еще ниже даже при жесткости бетонной смеси 60 с (0,25 %).

Наиболее выразительна зависимость предела прочности и водопоглощения по высоте изделия высотой 1,2 м. Зависимости, приведенные на рис. 3.3, свидетельствуют о высокой однороднос-

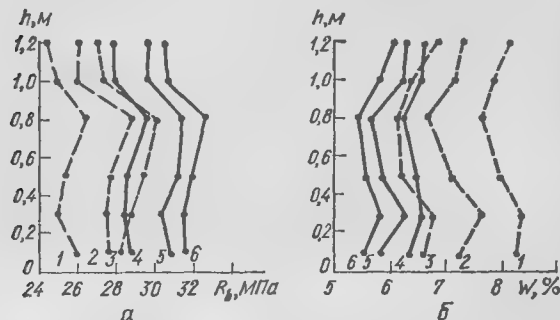


Рис. 3.3. Пределы прочности бетона и водопоглощения по высоте столба бетонной смеси при частоте 25 Гц и различных режимах колебаний (сплошной линией показан ударно-вибрационный, пунктирной — гармонический режимы):

1, 4 — $A_g = 1,5g$; 2, 5 — $A_g = 2,5g$; 4, 6 — $A_g = 3,5g$.

ти уплотнения столба бетонной смеси и эффективности ударно-вибрационных режимов.

Физическая особенность процесса уплотнения при низкочастотных режимах проявляется при формировании крупнопористых бетонов для строительства мелиоративных и других сооружений, макроструктура которых должна обеспечивать максимальную прочность при рациональном коэффициенте фильтрации. Бетоны состоят из

крупного заполнителя, который только обволакивается растворной составляющей, обеспечивая сквозную проницаемость его для воды.

Для получения крупнопористого бетона однородных макроструктур и фильтрационных свойств использовали однофракционный заполнитель из зерен фракции 5...10 мм. Стремясь создать достаточную площадь контактов между его зернами, вводили небольшое количество мелкого заполнителя — песка, позволяющего увеличить толщину слоя, обволакивающего зерна щебня и исключающего усадку цементного камня.

В исходных составах фильтрационных бетонов количество щебня принято равным 1260 кг, песка при $r = 0,1...0,2$ — 160...320 кг, цемента — 0,1...0,15 массы заполнителей (150...200 кг).

Для определения влияния направленности вибраций при максимальной частоте низкочастотной вибрации 30 Гц и ускорении 5 g образцы уплотняли горизонтальными и вертикальными симметричными колебаниями (табл. 3.3). При горизонтальной вибрации обеспечивается более равномерное уплотнение и отсутствуют заплывы пустот раствором в нижней части образца.

Из табл. 3.4 следует, что при частоте 10 Гц прочность крупнопористого бетона в 1,5 раза выше по сравнению со среднечастотными режимами.

Анализ статистических исследований получения дренажных бетонов прочностью 15 МПа при коэффициенте фильтрации около 300 м/сут позволяет рекомендовать рациональные параметры для получения крупнопористого бетона: частота вибрации — 10...30 Гц; ускорение вибра-

Таблица 3.3. Влияние направленности вибрации на прочность крупнопористых бетонов

Предел прочности через 7 сут нормального твердения, МПа			
при сжатии	при растяжении	при сжатии	при растяжении
<i>Направление приложения вибрации горизонтальное</i>			
11,0	1,55	10,8	1,50
10,9	1,57	11,1	1,48
<i>Направление приложения вибрации вертикальное</i>			
5,88	0,79	5,32	0,76
5,86	0,79	6,27	0,76

Таблица 3.4. Влияние режима вибрации на технические свойства крупнопористых бетонов

Параметры вибрации		Свойства бетона через 28 сут нормального твердения		
f , Гц	A_g , g	R_c , МПа	$\gamma_{ф}$, м/су	ρ , кг/м ³
10	2,5	15,6	300	1930
10	2,5	14,6	463	1940
50	3,0	10,7	463	1900
50	3,0	11,7	357	1890

Примечание. Время вибрирования — 2 мин.

ции — 3...4 g, время вибровоздействия — 0,5... 2 мин; водоцементное отношение — 0,32; расход цемента как отношение к массе заполнителей — 0,12; доля песка в составе заполнителей — 0,1.

При изготовлении дренажных труб расход цемента при низкочастотном вибрировании может быть снижен на 100 кг/м³ по сравнению со стандартными режимами.

3.2. ОСОБЕННОСТИ УДАРНО-ВИБРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЛЕГКОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

При изучении особенностей технологии рассмотрены режимы при частоте колебаний $f = 15$ Гц с верхним ускорением 2,5 g и асимметрией от 1 до 5 ($A_{гн}/A_{гв} = 1...5$). Подобраны составы для бетонов классов В15...В25 на цементах марки 400 с керамзитовым гравием насыпной плотностью 500 кг/м³ и истинным водоцементным отношением 0,4 (с учетом водопотребности заполнителей) (табл. 3.5).

Таблица 3.5. Составы керамзитобетонных смесей

Расход на 1 м ³ бетона				Ж, с
Ц, кг	В, л	П, кг	К, л	
250	186	597	1080	145
250	193	714	1000	114
250	202	831	920	57
300	197	501	1080	95
300	205	618	1000	45
300	213	735	920	34
350	208	405	1080	60
350	216	522	1000	21
350	225	641	920	14

В результате анализа статистических закономерностей установлено, что объем керамзита в 1 м³ бетона должен быть 1040 л. Режимы в зависимости от жесткости рекомендуется принимать в соответствии с данными табл. 3.6

Для определения эффективности предлагаемые режимы сравнивали со стандартными. При стандартном режиме ($f = 50$ Гц, $A_g = 3,5$ g) отформованы образцы составов: первый — Ц = 250 кг;

Таблица 3.6. Рекомендуемые режимы формирования жестких керамзитобетонных смесей

Расход цемента, кг/м³	Жесткость бетонных смесей, с	Параметры вибрации			$R_{сж}$, МПа
		$A_{гв}$, g	$A_{гн}/A_{гв}$	t_y , с	
250	15...30	2	2...3	60...90	12...13
	31...60	2,5...3	3...4	90...120	15...18
	61...90	3,5	5	120...180	20...25
300	15...30	1,5...2	2...3	45...60	27...28
	31...60	2...5	3	60...90	29
	61...90	2,5...3	3	90...120	29...30
350	15...30	1,5	2...3	30...45	27
	31...60	2	3	60...90	29
	61...90	2,5	3	90...120	30

$Q = 1000$ л; $\Pi = 702$ кг; $B = 205$ л и жесткость 90 с; второй — $\Pi = 350$ кг; $Q = 1000$ л; $\Pi = 518$ кг; $B = 220$ л и $Ж = 15$ с. В образцах первого состава прочность на 15,5 % ниже прочности состава, формируемого при низкочастотном режиме, второго — на 8 % ниже.

В зависимости от времени уплотнения и количества добавки проверена степень расслоения бетонной смеси подвижной консистенции при уплотнении стандартным режимом (средний состав бетона: $\Pi = 300$ кг; $Q = 1000$ л; $\Pi = 610$ кг; $B = 218$ л; $OK = 1...2$ см). Как видно из табл. 3.7, стандартные режимы приводят к значительному расслоению легкобетонных смесей, при этом существенно снижается и прочность бетона.

При уплотнении бетонных смесей в условиях низкочастотной вибрации с ускорением 1,5... 3,5 g и асимметрией 1...3 в течение 15...45 с установлено, что прочность уменьшается при увеличении расслоения. Рекомендуемые низко-

Таблица 3.7. Расслоение бетонных смесей при стандартном режиме

Количество добавки С-3, % массы цемента	t , с	$R_{сж}$, МПа	Степень расслоения, %	Количество добавки С-3, % массы цемента	t , с	$R_{сж}$, МПа	Степень расслоения, %
0	15	23,2	2	0,25	45	16,5	8
0	30	20,3	3	0,5	15	19,1	9
0	45	20,9	4	0,5	30	16,8	11
0,25	15	19,9	6	0,5	45	16,4	13
0,25	30	19,1	7				

Таблица 3.8. Рекомендуемые режимы вибровоздействия в зависимости от подвижности

OK, см	Количество добавки С-3, % массы цемента	Режимы вибровоздействия		
		f , Гц	$A_{г}$, g	t_y , с
1...2	0	15	2,5	45
3...4	0,25	10...15	2,0	30
9...11	0,5	10...15	1,5	15

Примечание. Асимметрия $A_{гн}/A_{гв} = 1$.

частотные режимы для подвижных бетонных смесей приведены в табл. 3.8.

Расслоение при уплотнении бетонных смесей в условиях низкочастотных режимов не превышает 3 %. Таким образом, низкочастотная вибрация показана для уплотнения легкобетонных смесей.

Интересно заметить, что при изготовлении изделий по так называемой литевой технологии невозможно обеспечить высокое качество поверхности (рис. 3.4).

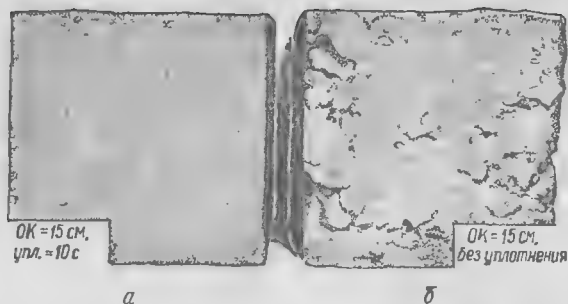


Рис. 3.4. Внешний вид образцов из бетонных смесей с $OK = 15...16$ см, уплотненных по технологиям:
а — вибтрационной; б — литевой

3.3. УДАРНО-ВИБРАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Площадки ударно-вибрационного действия конструкции ЛИСИ работают в диапазоне частот $15...25$ Гц с ускорением при положении площадки в верхней точке $1,5...2,5$ g, в нижней — $4...6$ g (рис. 3.5). Они обладают высокой надежностью и эффективностью уплотнения. Недостаток их — в необходимости устройства массивных фундаментов, так как динамическое нагружение на них в $4...6$ раза больше массы рамы с бетонной смесью.

Перспективны двухмассные резонансные виброплощадки конструкции Днепропетровского госуниверситета, ЭКБ Минуралсибстроя РСФСР и КТБ ППО «Моспромстройматериалы» (рис. 3.6). Нижняя масса выполняет роль фундамента, поэтому на основание передаются незначительные динамические нагрузки.

Площадки работают следующим образом. Возмущение от электродвигателя с помощью шатунно-кривошипного механизма передается на

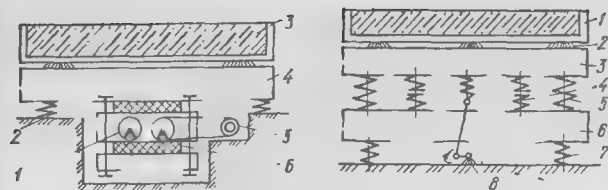


Рис. 3.5. Схема ударно-вибрационной площадки конструкции ЛИСИ:

1 — вибратор; 2 — упругие опоры; 3 — форма с бетонной смесью; 4 — рама; 5 — выносной электродвигатель; 6 — упругие прокладки

Рис. 3.6. Схема резонансной виброплощадки конструкции КТБ ППО «Моспромстройматериалы»:

1 — форма с бетонной смесью; 2 — электромагнит; 3, 6 — рамы соответственно верхняя и нижняя; 4 — буферный элемент; 5, 7 — резиновые элементы соответственно упругий и мягкий; 8 — шатунно-кривошипный механизм

верхнюю раму с формой. Колебательные движения верхней рамы с формой и бетонной смесью осуществляются на упругих элементах. Рамы 3 и 6 колеблются в противофазе, через буферные элементы обеспечивается их соударение. При этом в верхней точке реализуется ускорение $Ag_v = 1,5...2,5$ g, а в нижней — $6...8$ g.

При внедрении низкочастотных ударно-вибрационных площадок на различных заводах страны были выполнены комплексные технологические и динамические испытания. Установлено, что резонансные асимметричные виброплощадки обеспечивают стабильные колебания рабочего органа при любой нагрузке и эффективно уплотняют бетонные смеси жесткостью около 40 с по техническому вискозиметру. При этом время виброуплотнения сокращается в $1,5...2$ раза, что способствует повышению производительности технологических линий, уровень шума при работе такого оборудования на 15 дБА ниже серийного (табл. 3.9). В табл. 3.10 обобщен опыт изготов-

Т а б л и ц а 3.9. Техническая характеристика

Тип виброплощадки	Грузоподъемность, т	Высота без привода, мм	Жесткость уплотняемой бетонной смеси, с	Время вибрирования, мин	Амплитуда колебаний рабочего органа, мм
ВРА-5	5	1400	20...60	2...4	6...10
ВРА-8	8	1155	20...60	1,5...3	6...10
ВРА-8	8	916	До 20	1...2	2...4
ВРА-8Д	8	1136	До 40	1...2	1,5...3
ВРА-10	10	1386	20...60	2...4	6...10
ВРК-15	15	1405	20...60	2...4	6...10
ВРА-15	15	1263	До 60	2...4	4...8
(2×6М)					
ВРА-15	15	1159	20...60	2...4	6...10
2ВРА-15	15	1401	20...60	2...4	6...10
2ВРА-15	15	1271	До 60	2...4	4...8
2×6М	15	1091	До 20	1...2	2...4
ВРА-15М	15	900	До 20	1...2	2...4
ВРА-15	15	980	До 20	1...2	2...4
(2×6М)					
2ВРА-15	15	1034	До 20	1...2	2...4
ВРА-15Д	15	803	До 20	1...2	2...5
ВРА-20	20	1160	30...100	5...8	6...10
ВРА-20	20	1145	До 40	1,5...3	1,5...3,5
ВТ	20	1660	20...60	4...6	6...10
ВС	10	1600	20...60	2...4	5...10
2ВРА-10	10	1441	20...60	2...4	6...10

ления железобетонных изделий широкой номенклатуры.

Рамный тип оборудования, несмотря на его несомненные преимущества, требует большого количества типоразмеров вибрационных площадок. Поэтому машиностроители традиционно изготавливают площадки из блоков, которые обеспечивают монтаж площадки грузоподъемностью до 20 т. Таким же образом создаются площадки блочного типа с ударно-вибрационным принципом действия.

виброплощадок резонансных асимметричных

Частота колебаний, об/мин	Расчетная динамическая нагрузка на фундамент, Н	Масса виброплощадки (без заполнения рамы), кг	Установленная мощность, кВт
550, 600, 650	29 000	5900	22
550, 600, 650	33 000	7700	22
780, 830, 880	28 170	8118	22
850, 900, 950	14 350	8286	22
550, 600, 650	52 800	11 000	30
550, 600, 650	67 800	13 260	30
550, 600, 650	70 000	14 750	30
550, 600, 650	70 000	12 600	30
550, 600, 650	70 000	12 680	30
550, 600, 650	70 000	15 090	30
850, 900, 950	38 000	14 250	45
780, 830, 880	35 620	12 500	40
830, 900, 970	38 700	13 920	45
780, 830, 880	35 620	13 000	40
850, 900, 950	17 300	14 400	45
600, 650, 700	86 000	12 500	40
850, 500, 950	16 700	14 000	55
550, 600, 650	55 000	16 000	75
550, 600, 650	34 800	13 000	30
550, 600, 650	52 800	10 300	30

пом действия. Так, площадка СМЖ-538 конструкции ВНИИстройдормаша (рис. 3.7) состоит из отдельных блоков с двумя самосинхронизирующимися вибраторами. Каждый блок работает самостоятельно, что удобно при техническом обслуживании и ремонте. Но так как не обеспечена синхронизация всех блоков между собой, возможно возникновение неоднородности уплотнения бетонной смеси, особенно жесткой. Поскольку форма не закреплена, управлять процессом сложно.

Таблица 3.10. Эксплуатационные ха-

Изделие, класс бе- тона	Частота вибрации	Условия твер- дения (подъ- ем, изотерми- ческий про- грев, остыва- ние), ч	Расход на м³ бетона			
			Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг
Плиты пе- рекрытий, В15	Низкая	2+3+2	244	138	678	1370
	Средняя	2+4+2	260	147	678	1370
Ребристые плиты, В25	Низкая	3+4+1	380	195	590	1250
	Средняя	4+6+1	410	205	590	1250
Плиты ог- раждений, В15	Низкая	3+6+4	320		665	1150
		Нормаль- ное твер-	300	150	787	1150
	Средняя	3+6+4	350		645	1120

Примечание. Цемент марки 400.

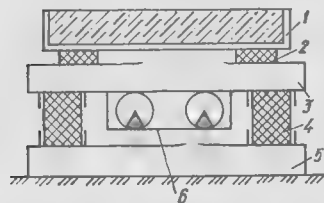


Рис. 3.7. Принципиальная схема площадки СМЖ-538 конструкции ВНИИстрой-дормаша:

1 — форма с бетонной смесью; 2 — упругая прокладка; 3 — верхняя рама; 4 — опорный резиновый элемент; 5 — опорная рама; 6 — виброблок

Однако, как показывает опыт их эксплуатации, они гарантируют уплотнение бетонной смеси жесткостью 20 с по техническому вискозиметру.

Совместно с заводом ЖБИ-18 в ППО «Моспромстройматериалы» разработана двухтумбовая площадка (рис. 3.8), используемая для изготовления аэродромных плит типа ПАГ и ригелей, в которой предусмотрена синхронизация блоков. Вибротумбы установлены на резиновых опорах, значительно снижающих нагрузки на

характеристики низкочастотных виброплощадок

Удобоукладываемость смеси		Предел прочности МПа		Коэффициент вариации по скорости продольных волн, %
Ж, с	ОК, см	после герметической обработки	через 28 сут	
40	—	14,3	20,4	6,1...9,1
30	—	13,7	19,5	6,7...13,8
30	—	23,3	33,4	3,1...4,4
—	2	20,5	29,4	3,1...3,5
—	1	34	34	3,5...5,1
115	—	—	29,2	—
—	2...3	25,6	25,6	6,3...8,2

фундамент и уровни шума. Вал вибратора имеет два выхода, что дает возможность применять для повышения надежности два электродвигателя.

Техническая характеристика площадки СМЖ-538

Максимальная грузоподъемность	18 000 кг
Характер колебаний	Вертикально направленные ударно-вибрационные
Частота колебаний	1500±100 кол/мин
Количество вибраторов	4
Суммарная установленная мощность	12 кВт
Напряжение тока	220/380 В
Управление виброплощадкой	Дистанционное с пульта
Габариты	6700×2595×670 мм
Масса виброплощадки (без пульта управления)	6430±200 кг

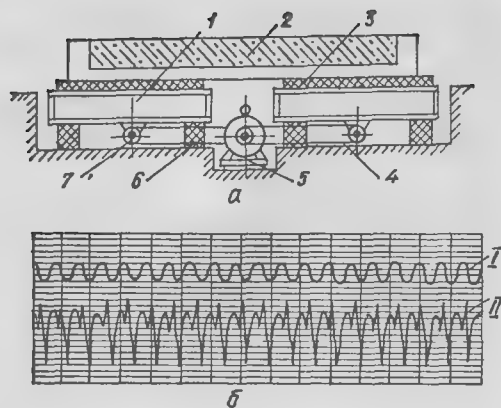


Рис. 3.8. Принципиальная схема двухтумбовой площадки и режимы колебаний формы с бетонной смесью:

a — схема площадки; 1 — вибротумба; 2 — форма с бетонной смесью; 3 — упругая прокладка; 4 — клиноременная передача; 5 — электродвигатель; 6 — резиновая опора; 7 — вибратор; 6 — осциллограммы ускорений площадки и формы; I — колебания площадки; II — колебания формы

Электродвигатель закреплен на опоре, что обеспечивает автоматическое натяжение ремней. При работе виброплощадки без нагружения все основные динамические параметры во времени изменяются по гармоническому закону.

Техническая характеристика двухтумбовой площадки

Грузоподъемность, т	15
Частота колебаний, Гц	25
Амплитуда колебаний, мм	1,1... 1,2
Мощность электродвигателя, кВт	22
Количество двигателей, шт	2
Габариты, мм:	
длина	4500
ширина	1500
высота	615

Для создания виброударного режима на столе виброплощадки устанавливается форма с бетонной смесью на упругую резиновую прокладку. Во время работы площадки с определенной частотой и ускорением, превосходящим силу тяжести, форма отрывается от стола площадки. Значение импульсов при соударении зависит от режимов работы площадки, соотношения масс формы с бетонной смесью и столом площадки и жесткости упругих элементов.

Условие, при котором форма будет отрываться от виброплощадки, а период ударов будет равен периоду колебаний площадки, можно представить в следующем виде:

$$\frac{A\omega^2}{g} > 1,$$

при этом

$$z = \frac{p_0}{m_1 + m_2}, \quad 1 < z < 3,8, \quad (3.1)$$

где A — амплитуда; ω — угловая частота; p_0 — амплитуда вынуждающей силы; m_1 — масса формы с бетонной смесью; m_2 — масса виброплощадки.

Величина p_0 определяется:

$$p_0 = \frac{k\omega^2}{g}; \quad k = m_0 r_0, \quad (3.2)$$

где k — статический момент дебалансов; m_0 — неуравновешенная масса дебалансов; r_0 — эксцентриситет дебалансов.

Наряду со статическим моментом дебалансов и соотношением масс на частоту соударений будет оказывать влияние жесткость прокладки. Как видно из рис. 3.9, можно получить ускорение в 3...4 раза выше исходного гармонического.

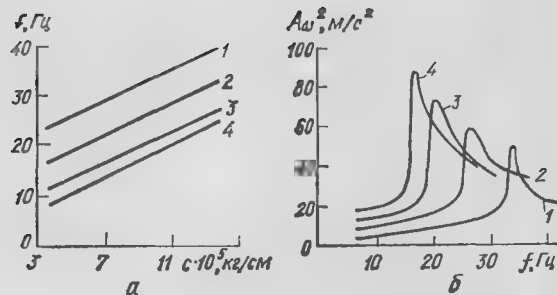


Рис. 3.9. Влияние на частоту колебаний:

a — жесткости прокладки c ; b — ускорения соударений при соотношении масс $m_1/m_2 = 2$; 1...4 — статический момент дебалансов соответственно 3,52; 6; 18; 9,1 и 13,4 кг·см

Это обеспечивает высокую эффективность уплотнения.

Весьма удачной следует считать разработку ЦНИИСа Минтрансстроя СССР совместно с Гипростроммашем ударно-вибрационной площадки УВП-10 и ее модификации СМЖ-773 (рис. 3.10).

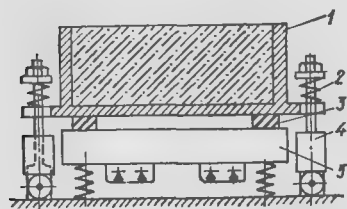


Рис. 3.10. Ударно-вибрационная площадка конструкции ЦНИИСа и Гипростроммаша:

1 — форма с бетонной смесью; 2 — упругая прижимная пружина; 3 — упругая прокладка; 4 — прижимной механизм; 5 — рама с виброблоком

На раме установлены виброблоки, синхронизированные с помощью карданных валов и синхронизаторов. Форму с бетонной смесью помещают на раму и закрепляют прижимными устройствами. Оптимальный режим работы УВП-10 назначают на основе динамического расчета. В отли-

чие от серийных площадок вдвое меньшая частота повышает надежность работы и снижает энергетические затраты.

Техническая характеристика виброплощадки СМЖ-773

Грузоподъемность	≤ 20 т
Характер колебаний	Вертикально-направленно-вибрационные
Частота колебаний (ударов)	25 Гц
Размах колебаний	1,2...2,5 мм
Суммарный статический момент массы дебалансов вибровозбудителей:	
наименьший (основные дебалансы)	100 Н·м
наибольший (основные дебалансы с грузами)	138 Н·м
Размеры формуемых изделий:	
длина	≤ 7200 мм
ширина	≤ 3600 мм
высота	≤ 1500 мм
Крепление формы	Электромагнитное
Жесткость бетонной смеси по техническому вискозиметру	≤ 60 с
Время уплотнения	≤ 180 с
Установленная мощность	≤ 50 кВт
Суммарная жесткость вибронизолируемых пружин	≤ 108,8 кН/см
Суммарная жесткость пружин для поджатия формы	≤ 30,6 кН/см
Габариты:	
длина	≤ 8100 мм
ширина	≤ 3100 мм
высота	≤ 900 мм
Масса:	
вибрирующих частей	≤ 5800 кг
общая	≤ 8450 кг

4. УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ВИБРОУПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Принципы управления параметрами вибрационных воздействий, сформулированные В. Г. Зазимко, состоят в следующем:

переменность частот при симметричных режимах и использование на первой стадии более низких;

целесообразность на первой стадии варьирования угла наклона результирующих колебаний; изменение асимметрии на второй стадии;

использование пригруза на второй стадии и его противофазную работу.

При управлении предполагается и ряд других особенностей, например, обеспечение при постоянной уплотнении толщины слоя, соответствующего частоте вибрации и т. д.

Особенно большое внимание целесообразно уделить первой стадии, которая в исследованиях до настоящего времени не выделялась.

4.1. РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УПЛОТНЕНИЯ НА ПЕРВОЙ СТАДИИ ФОРМОВАНИЯ

Чтобы представить себе скорость процесса уплотнения бетонных смесей при различных частотах вибровоздействия, рассмотрим оседание столба смеси жесткостью 100 с высотой 30 см в рыхлом состоянии при виброуплотнении с частотой 25 и 50 Гц. Из характера процесса следует вывод о более высоких скоростях при частоте 25 Гц (рис. 4.1), что подробно исследуется в работе В. Г. Зазимко [12].

При моделировании процесса формирования бетонной смеси с цементом марки 400 Каменец-

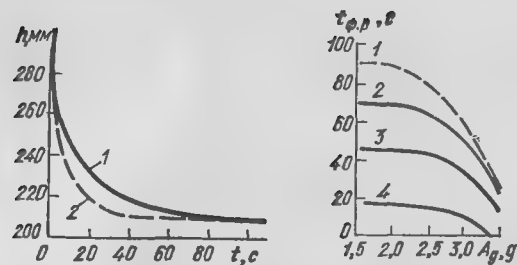


Рис. 4.1. Процесс уплотнения бетонных смесей при различных режимах вибрации:

1 — $f = 50$ Гц, $A_g = 3,5g$; 2 — $f = 25$ Гц, $A_g = 2,5g$

Рис. 4.2. Зависимость времени формообразования $t_ф$ при вертикальных колебаниях от ускорения при частотах:

1...4 — соответственно 50, 30, 20 и 10 Гц

Подольского завода (при $(В/Ц)_{нач} = 0,65$) авто-ры использовали электродинамические стенды ВЭДС-400 и ВЭДС-100Б. При этом изменяли: коэффициент раздвижки зерен α , толщину пленки цементного теста δ , истинное водоцементное отношение и жесткость бетонной смеси по техническому вискозиметру от 10 до 200 с (табл. 4.1).

Для оценки технических свойств бетона изготовили образцы в виде призм размерами $10 \times 10 \times 30$ (большой размер — в направлении горизонтальной составляющей). Время уплотнения приняли равным времени формообразования и переупаковки крупных частиц $t_ф$ (выравнивание поверхности конуса в кубической форме) и увеличили на 1 и 2 мин: $t_ф + 1$, $t_ф + 2$. Образцы испытаны через 7 сут твердения в нормальных условиях (табл. 4.2).

Из результатов следует, что в условиях малоинтенсивных режимов нельзя обеспечить высо-

Таблица 4.1. Составы

Характеристика состава				
Расход на 1 м³ бетона				λ
Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг	
300	195	772	1109	1,5
287,5	187	757	1156	1,4
275	179	742	1203	1,3
262,5	171	722	1255	1,2
250	162	699	1313	1,1
287,5	187	804	1109	1,5
275	179	789	1156	1,4
262,5	179	773	1204	1,3
250	162	757	1255	1,2
300	195	569	1313	1,1
275	179	836	1109	1,5
262,5	171	821	1156	1,4
250	162	808	1204	1,3
300	195	627	1255	1,2
287,5	187	601	1313	1,1
262,5	171	868	1109	1,5
250	162	855	1156	1,4
300	195	677	1204	1,3
287,5	187	658	1255	1,2
275	179	633	1313	1,1
250	162	902	1109	1,5
300	195	725	1156	1,4
287,5	187	709	1204	1,3
275	179	690	1255	1,2
262,5	171	664	1313	1,1

кую степень уплотнения жестких смесей, поэтому прочность бетона невысока. Горизонтальная вибрация обеспечивает для граничных условий стандартного метода значительное снижение (до 16 раз) жесткости бетонной смеси. Интересны также статические зависимости времени перепаковки (формообразования) от ускорения колебаний при различных частотах (рис. 4.2). Ско-

бетона и режимы формования

		Режимы формования		
$\delta \cdot 10^{-5}$, м	(В/Ц) _{норм}	f, Гц	A _г , g	Угол наклона, град
1,48	0,27	50	3,5	90
1,40	0,25	40	3,0	67
1,33	0,23	30	2,5	45
1,27	0,21	20	2,0	22
1,21	0,19	10	1,5	0
1,21	0,24	30	2,0	0
1,14	0,22	20	1,5	90
1,06	0,20	10	3,5	67
0,97	0,18	50	3,0	45
2,66	0,30	40	2,5	22
0,97	0,22	10	3,0	22
0,89	0,19	50	2,5	0
0,8	0,17	40	2,0	90
2,24	0,29	30	1,5	67
2,24	0,28	20	3,5	45
0,75	0,18	40	1,5	45
0,65	0,16	30	3,5	22
1,94	0,29	20	3,0	0
1,89	0,27	10	2,5	90
1,87	0,25	50	2,0	67
0,52	0,15	20	2,5	67
1,69	0,28	10	2,0	45
1,62	0,26	50	1,5	22
1,56	0,24	40	3,5	0
1,54	0,22	30	3,0	90

рость перекомпоновки частиц может быть при низких частотах в 5...10 раз выше по сравнению со стандартными режимами. Более подробные исследования режима перекомпоновки (формообразования) приведены для вертикально направленных колебаний с частотой 15 Гц и ускорением 2g (табл. 4.3). Время формообразования для низких частот составляет примерно 0,3...

Таблица 4.2. Свойства

Реологические характеристики				Предел проч. МПа
$Ж_{с}, с$	$t_{ф.с}, с$	$Ж_{п}, с$	$t_{ф.р}, с$	$t_{ф}$
40,5	25	40,5	25	1,88
60	30	8	8	0,81
27	22	8	8	1,362
>200	38	31	25	1,39
21	21	>200	>200	1,605
60	44	27	21	1,456
72	35	19	19	1,83
31	31	21	14	—
77	30	30	30	1,365
37	20	9	9	1,338
—	—	—	—	—
38	18	12	12	1,415
139	40	80	40	1,781
31	18	45	45	1,591
18	11	8	8	1,548
33	22	38	15	0,764
32	21	21	21	0,968
16	11	8	8	1,335
33	33	15	15	1,554
21	21	30	12	1,306
42	29	24	24	1,191
18	18	9	9	1,497
18	18	49	35	1,191
11	11	9	9	1,43
20	12	16	16	1,369

Примечание. $Ж_{с}, Ж_{п}$ — жесткость соответственно стан образования при режимах соответственно стандартном и исследуемом.

0,5 жесткости бетонной смеси. При этом даже для первой стадии обеспечивается высокая прочность бетона. Режимы формирования для бетонных смесей жесткостью 40...140 с рекомендуются при частоте 10...15 Гц и ускорении до 2g.

Бетонной смеси и бетона

ноты при раскалывания,		Предел прочности при сжатии, МПа		
$t_{ф} + 1$	$t_{ф} + 2$	$t_{ф}$	$t_{ф} + 1$	$t_{ф} + 2$
1,63	2,06	11,78	12,67	15,25
0,535	0,636	7,33	6,53	7,41
1,76	1,367	10,91	12,83	13,96
1,675	1,215	13,64	16,38	15,41
1,621	—	13,88	13,48	—
1,47	1,385	12,75	10,75	10,43
1,81	2,13	13,72	12,83	10,83
—	—	—	—	—
1,082	1,35	10,11	13,80	13,80
1,497	1,541	10,91	14,52	14,86
—	—	—	—	—
1,455	1,602	1,186	1,646	1,509
2,622	1,65	10,27	15,57	8,36
1,178	1,70	14,69	15,25	15,89
1,42	1,541	12,91	13,80	14,69
1,322	1,191	8,52	11,23	11,62
1,401	1,427	10,51	10,83	12,83
1,81	1,18	13,72	15,09	14,77
1,503	1,319	12,26	12,42	12,83
1,72	1,42	10,67	14,92	15,01
1,408	1,147	10,43	11,46	12,90
1,338	1,561	12,02	10,99	15,89
1,325	1,312	11,70	13,80	14,92
1,28	1,465	13,39	15,09	15,41
1,217	1,299	12,26	12,34	11,78

дартная и при исследуемом режиме; $t_{ф.с}, t_{ф.р}$ — время формо-

4.2. УПЛОТНЕНИЕ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПРИ РЕЖИМАХ ВИБРАЦИИ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ

Авторами приняты три плавных режима формирования с начальной частотой 10 Гц и ускорением 2g. Первый за время формирования плавно из-

Таблица 4.3. Составы бетона и свойства бетонной смеси

Расход на 1 м³ бетона				а	$\delta \cdot 10^{-5}, \text{м}$	(В/Ц) _{ист}	Ж ₂₈ , с	$t_{фр}, \text{с}$
Ц, кг	Б, л	Г, кг	Щ, кг					
250	162	696	1315	1,1	1,22	0,19	117	50
250	162	801	1210	1,3	0,82	0,17	143	60
250	162	901	1110	1,5	0,52	0,15	113	45
275	179	630	1315	1,1	1,89	0,25	56	15
275	179	735	1210	1,3	1,36	0,23	86	25
275	179	835	1110	1,5	0,97	0,22	70	35
300	195	567	1315	1,1	2,67	0,30	45	20
300	195	671	1210	1,3	1,97	0,29	32	20
300	195	771	1110	1,5	1,48	0,27	41	25

меняли до частоты 25 Гц и ускорения 2,5g, второй — до частоты 50 Гц и ускорения 3,5g и третий — до 75 Гц и 4,5g. Полное время уплотнения t составляло $t_{ф} + 1$; $t_{ф} + 2$; $t_{ф} + 3$ мин. Работа выполнена для тех же составов, которые представлены в табл. 4.3 с использованием цемента Балаклеевского завода. Все исходные данные сгруппированы и приведены в табл. 4.4 в виде 27 вариантов «состав — режим».

На рис. 4.3, а, б даны зависимости пределов прочности при 7 сут нормального твердения, значения коэффициентов уплотнения и морозостойкости бетонов, уплотненных при переменных плавных режимах в зависимости от такой характеристики состава, как толщина пленки цементного камня δ . Из рис. 4.4 следует, что переменные режимы обеспечивают уплотнение смесей средней и даже повышенной жесткости. Морозостойкость при -50°C достаточно высока и конечные значения частот 50 Гц и 75 Гц примерно

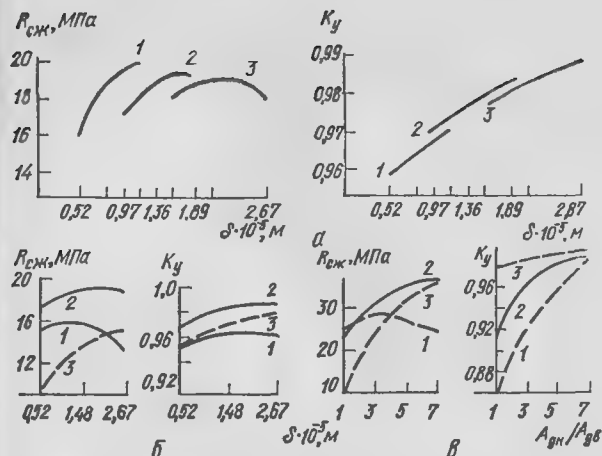


Рис. 4.3. Зависимость технических свойств бетона от различных значений вибрационных режимов:

а — в возрасте 7 сут при плавном регулировании частоты 50 Гц с ускорением 3,5g; б — при двухступенчатом режиме (бетон в возрасте 7 сут); в — при асимметричном режиме (бетон в возрасте 28 сут); 1...3 — жесткость соответственно 100...140, 50...90 и 30...40 а

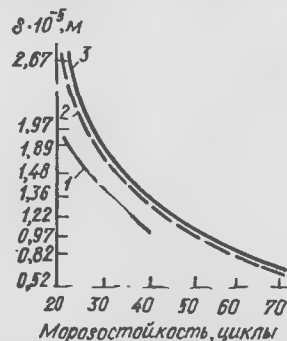


Рис. 4.4. Зависимость морозостойкости при -50°C от толщины пленки цементного теста:

1 — $f = 25$ Гц, $A_g = 2,5$; 2 — $f = 50$ Гц, $A_g = 3,5g$; 3 — $f = 75$ Гц, $A_g = 4,5g$

Таблица 4.4. Составы бетонных смесей

Номер вари- анта	Расход на 1 м³ бетона				α
	Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг	
1 10 19	250	162	696	1315	1,1
2 11 20	250	162	801	1210	1,3
3 12 21	250	162	901	1110	1,5
4 13 22	275	179	630	1315	1,1
5 14 23	275	179	735	1210	1,3
6 15 24	275	179	835	1110	1,5
7 16 25	300	195	567	1315	1,1
8 17 26	300	195	671	1210	1,3
9 18 27	300	195	771	1110	1,5
28 стандарт	250	162	801	1210	1,3

в режиме формирования на конечной стадии

$\delta \times 10^{-5}$, м	$(B/C)_{\text{нст}}$	Режимы формирования			Ж, с
		f , Гц	A_g , г	t_{ϕ} , с	
1,22	0,19	25	2,5	50	117
		50	3,5		
		75	4,5		
0,82	0,17	25	2,5	60	143
		50	3,5		
		75	4,5		
0,52	0,16	25	2,5	45	113
		50	3,5		
		75	4,5		
1,89	0,25	25	2,5	15	
		50	3,5		
		75	4,5		
1,36	0,24	25	2,5	25	86
		50	3,5		
		75	4,5		
0,97	0,22	25	2,5	35	70
		50	3,5		
		75	4,5		
2,67	0,30	25	2,5	20	35
		50	3,5		
		75	4,5		
1,97	0,29	25	2,5	20	32
		50	3,5		
		75	4,5		
1,48	0,27	25	2,5	25	41
		50	3,5		
		75	4,5		
0,82	0,17	const = 50	const = 3,5	45	143

равны по эффективности. Рекомендации для уплотнения «режим — состав» представлены в табл. 4.5.

Таблица 4.5. Рекомендуемые режимы на завершающей стадии уплотнения

Ж, с	$\delta \cdot 10^{-5}$, м	t , Гц; A_g , г	$T = t_\phi + t_y$, мин
30...40	1,5...2,7	25; 25	1
50...90	0,9...1,9	50; 3,5	2
100...140	0,5...1,2	75; 4,5	2

Наиболее рациональны в реализации ступенчатые режимы. Выполнены исследования при изменении частоты в процессе формирования по двухступенчатому режиму для вариантов, данных в табл. 4.4. Режимы формирования представлены в табл. 4.6. Время доуплотнения принято $t_\phi + 1$; $t_\phi + 2$; $t_\phi + 3$ мин. Основные технические свойства приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.6. Режимы формирования

Номера вариантов (см табл. 4.4)	Первая стадия		Вторая стадия		Ж, с
	f , Гц	A_g , г	f , Гц	A_g , г	
1...9			25	2,5	30...40
10...18	15	2,0	50	3,5	50...90
18...27			75	4,5	110...140

Графический анализ (рис. 4.3, б) показывает, что при двухступенчатом режиме симметричного виброуплотнения можно эффективно уплотнять бетонные смеси жесткостью 50...90 с по техни-

Таблица 4.7. Технические свойства бетонной смеси при уплотнении на второй стадии

Номера вариантов режимов (составов, согласно табл. 4.4)	$t_\phi + 1$ мин			$t_\phi + 2$ мин			$t_\phi + 3$ мин		
	$R_{сж}$, МПа	K_y	W , %	$R_{сж}$, МПа	K_y	W , %	$R_{сж}$, МПа	K_y	W , %
1 (1)	20,7	0,96	3,7	20,4	0,95	3,9	21,5	0,98	3,6
2 (2)	15,5	0,94	4,4	17,4	0,94	1,2	18,8	0,94	3,7
3 (3)	18,0	0,95	2,2	17,5	0,95	2,8	19,9	0,95	2,0
4 (4)	21,3	0,99	3,2	19,0	0,98	1,1	18,8	0,98	3,0
5 (5)	20,2	0,96	4,1	20,2	0,99	3,4	22,7	0,98	3,0
6 (6)	18,3	0,94	4,2	20,2	0,95	3,7	19,4	0,97	3,9
7 (7)	14,2	0,99	5,0	17,5	1,0	4,2	18,3	0,98	4,5
8 (8)	15,5	0,95	4,3	15,3	0,95	4,5	16,4	0,96	4,8
9 (9)	17,5	0,98	3,9	18,3	0,97	4,1	16,9	0,98	4,1
10 (1)	20,2	0,97	3,8	22,1	0,96	3,7	19,8	0,97	4,0
11 (2)	15,2	0,94	4,4	19,9	0,96	4,3	19,9	0,96	4,2
12 (3)	19,9	0,93	2,6	21,0	0,94	2,2	20,2	0,96	3,0
13 (4)	21,2	0,99	1,7	21,2	0,98	2,7	23,4	0,99	3,8
14 (5)	23,0	0,97	2,5	23,0	0,98	2,8	22,9	0,95	4,4
15 (6)	19,3	0,94	4,7	21,6	0,98	2,4	18,5	0,94	4,6
16 (7)	16,9	0,98	4,5	16,0	0,98	4,8	17,5	0,98	4,3
17 (8)	19,0	0,96	4,9	20,7	0,97	4,6	21,5	0,98	4,5
18 (9)	18,2	0,96	4,1	15,0	0,98	4,8	17,7	0,97	4,2
19 (1)	19,9	0,96	3,8	18,8	0,99	3,8	21,5	0,99	3,8
20 (2)	16,3	0,95	4,1	22,7	0,95	3,8	22,4	0,95	3,9
21 (3)	19,0	0,93	2,6	22,9	0,94	3,3	22,9	0,95	2,6
22 (4)	22,1	0,97	2,4	20,5	0,99	3,2	22,7	0,98	4,0
23 (5)	24,4	0,98	3,6	25,6	0,98	4,1	22,0	0,97	3,4
24 (6)	25,1	0,98	3,6	22,4	0,97	4,1	23,0	0,98	3,0
25 (7)	13,2	0,96	5,2	15,2	1,0	4,2	17,9	0,98	4,3
26 (8)	17,2	0,99	4,0	18,2	0,97	3,9	16,4	0,99	4,3
27 (9)	17,5	0,96	4,8	17,9	0,97	4,4	18,0	0,98	4,1

ческому вискозиметру (ГОСТ 10181.1—81) в течение времени $t_\phi + 2$, т. е. 30 с + (1,5...2) мин. Наиболее экономичны составы бетонной смеси в толщину пленки цементного теста (камня) по-рядка $(1,2...1,4) \cdot 10^{-5}$ м.

При уплотнении бетонных смесей асимметричными режимами для ускорения процесса на первой стадии целесообразны симметричные режимы с плавным регулированием асимметрии для второй стадии.

Таким образом, процесс формирования поделен на две стадии — формообразования и доуплотнения.

Определено время формообразования. На этой стадии использован симметричный режим с частотой 15 Гц и ускорением 2,5g. Вторая стадия осуществлялась при том же симметричном режиме или при плавном переходе от режима формообразования к асимметрии с ее увеличением до $A_{гн}/A_{гв} = 3; 5; 7$. Верхнее ускорение во всех случаях было постоянным и равным $A_{гв} = 2,5g$. Полное время формования образцов во всех вариантах режимов составляло $T = t_{\phi} + t_{\gamma}$, причем t_{γ} изменялось в пределах от 2,5 до 3,5 мин.

Для бетона при решении этой задачи также использован портландцемент Каменец-Подольского завода. Приняты по девять составов бетона для трех коэффициентов раздвижки зерен крупного заполнителя — $\alpha = 1,1; 1,3; 1,5$ (табл. 4.8). Таким образом, оказалось 27 вариантов, в которых расход цемента изменялся от 250 до 300 кг/м³. Начальное водоцементное отношение взято постоянным и равным 0,65, истинное изменялось в соответствии с изменением всех составляющих бетона.

Для каждого из вариантов исследуемой системы «состав — режим» изготовили по восемь образцов-кубов с размером стороны 10 см, которые испытывали через 28 сут хранения в нормальных условиях.

Т а б л и ц а 4.8. Составы бетона, удобоукладываемость бетонной смеси и режимы формования

Номер варианта	Расход на 1 м ³ бетона				Режимы формования					
	Ц, кг	З, л	П, кг	Щ, кг	$\alpha \cdot 10^{-5}$, м	В/Ц _{норм}	Ж, с	t_{ϕ} , с	t_{γ} , мин	$A_{гн}/A_{гв}$
<i>При $\alpha = 1,1$</i>										
1									2,7	1
2									2,5	7
3	300	195	567	1315	2,67	0,30	35	20	2,5	1
4									2,5	3
5									2,5	1
6									3,5	7
7	250	162	696	1315	1,22	0,19	117	50	2,5	1
8									3,5	3
9									3,0	5
10									2,5	1
11	275	179	630	1315	1,89	0,25	56	15	3,5	5
12									3,0	7
13									3,0	3
14	300	195	567	1315	2,07	0,30	35	20	3,0	5
15	250	162	697		1,22	0,19	117	50	3,0	5
<i>При $\alpha = 1,3$</i>										
16									2,5	1
17									2,5	7
18	300	195	671	1210	1,97	0,29	32	20	2,5	1
19									2,5	3
20									2,5	1
21									3,5	7
22	250	162	801	1210	0,82	0,17	143	60	2,5	1
23									3,5	3
24									3,0	5
25									2,5	1
26	275	179	735	1210	1,36	0,23	86	25	3,5	5
27									3,0	7
28									3,0	3
29	300	195	671	1210	1,97	0,29	32	20	3,0	5
30	250	162	801		0,82	0,17	143	60	3,0	5

Продолжение табл. 4.8

Номер вар- ианта	Расход на 1 м³ бетона				Режимы формирования						
	Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг	$\gamma \cdot 10^{-5}, \text{м}$	В/Ц _{нот}	Ж, с	$\phi, \text{в}$	$\gamma, \text{мин}$	$A_{гн}/A_{гв}$	
При $\alpha = 1,5$											
31									2,5	1	
32									2,5	7	
33	300	195	771	1110	1,48	0,27	41	25	2,5	1	
34									2,5	3	
35									2,5	1	
36									3,5	7	
37	250	162	901	1110	0,52	0,16	113	45	2,5	1	
38									3,5	3	
39									3,0	5	
40									2,5	1	
41	275	179	835	1110	0,97	0,22	70	35	3,5	5	
42									3,0	7	
43									3,0	3	
44	300	195	771	1100	1,48	0,27	41	25	3,0	5	
45	250	162	901	1100	0,52	0,16	113	45	3,0	5	

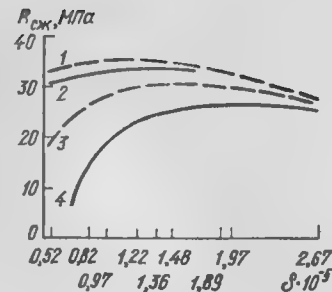
Результаты испытаний предела прочности свидетельствуют о высокой эффективности уплотнения (рис. 4.3, в). Если за показатель эффективности принять отношение предела прочности в возрасте 28 сут твердения к расходу цемента марки 400, то это значение составит 0,12...0,13, а для обычных способов уплотнения — 0,08...0,1. Таким образом, эффективные способы уплотнения обеспечивают высокую эффективность использования цемента. Влияние асимметрии режима на прочность хорошо иллюстрирует рис. 4.5.

В табл. 4.9 обобщены данные по рекомендуемым режимам виброуплотнения тяжелых бетонных смесей различной удобоскладываемости.

Рис. 4.5. Зависимость предела прочности от толщины пленки цементного камня при частоте 15 Гц и различных значениях асимметрии:

1...4 — $A_{гн}/A_{гв}$ соответственно: равно 7,5, 3 и 1

Приведены результаты как для симметричных, так и для асимметричных колебаний.



Переменные режимы вибрации можно эффективно использовать и при уплотнении легкобетонных смесей. Эти исследования выполнены для состава Ц : В : П : К = 300 : 205 : 318 : : 1000 л при $(В/Ц)_{нот} = 0,3$. Для определения параметров режима использовали виброуплотнение с частотами 10...50 Гц при ускорении 1,5...3,5g. Режимы уплотнения представлены в табл. 4.11.

Из рис. 4.6 следует, что для первой стадии достаточны режимы уплотнения с частотой 15..

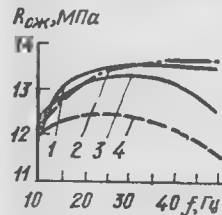


Рис. 4.6. Зависимость предела прочности в возрасте 7 сут легкого бетона, уплотненного на I стадии, от режимов вибрации:

1...4 — ускорение соответственно равно 2,5; 3,5; 2 и 1,5g

20 Гц и ускорением 2,0...2,5g. При двухстадийном уплотнении можно рекомендовать режимы, представленные в табл. 4.10.

Таким образом, управляемые режимы вибрации обеспечивают повышение прочности бетона

Таблица 4.9. Рекомендуемые режимы формо-

Удобоукладываемость смеси	Вид изделия	Двухстадийное формование плав			
		формообразование $t_{\phi} = 1/2 \text{ Ж}$			
		$f, \text{ Гц}$	$A_{\phi}, \text{ г}$	$f, \text{ Гц}$	
$\text{Ж} = 140 \dots 190 \text{ а}$	Плоское	10...15	2,0...2,5	15	
		25...30	3,5...5,0	50...75	
	Высокое	10...15	2,0...2,5	15	
				40...50	
$\text{Ж} = 90 \dots 140 \text{ а}$	Плоское	10...15	2,0...2,5	15	
		25...30	3...4	50...75	
	Высокое	10...15	2,0...2,5	15	
				50...75	
$\text{Ж} = 40 \dots 90 \text{ а}$	Плоское	10...15	2,0...2,5	10...15	
		25...30	3...4	40...50	
	Высокое	10...15	2,0...2,5	10...15	
				25...50	
$\text{Ж} = 30 \dots 40 \text{ с}$	Плоское	10...15	1,5...3,0	10...15	
		25...30	2...3	40...50	
	Высокое	10...15	1,5...2,0	10...15	
				25...30	
$\text{ОК} = 1 \dots 4 \text{ см}$	Плоское	10...15	1,5...2,0	10...15	
		25...30	2...3	40...50	
	Высокое	10...15	1,5...2,0	10...15	
				25...50	

вания бетонных смесей вертикальной вибрацией

ное или ступенчатое			Одностадийное формование				
доуплотнение			$f, \text{ Гц}$	$A_{\phi}(A_{\phi\phi}), \text{ г}$	$A_{\phi\phi}/A_{\phi\phi}$	$T, \text{ мин}$	
	$A_{\phi}(A_{\phi\phi}), \text{ г}$	$A_{\phi\phi}/A_{\phi\phi}$					
	2,5...3,0	6...7	3	10...15	2,5...3,0	6...7	4,5
	4...6	1		25...50	5...7	1	
	2,5...3,0	6...7		10...15	2,5...3,0	6...7	
	5...7	1		25...30	5...7	1	
	2,5...3,0	4...6	3	10...15	2,0...2,5	4...6	
	4...5	1		25...50	4...6	1	
	2,5...3,0	4...6		10...15	2,0...2,5	4...6	4,0
	4...5	1		25...30	4...5	1	
	2,0...2,5	3...5	2,5	10...15	2,0...2,5	3...5	
	3,0...4,0	1		25...50	4...5	1	
	2,0...2,5	3...5		10...15	2,0...2,5	3...5	2,5
	3,5...5,0	1		25...30	3...4	1	
	2,0...2,5	2...4	2	10...15	2,0...2,5	2...4	
	3...4	1		25...50	3...4	1	2,5
	2,0...2,5	2...4		10...15	1,75...2,0	2...4	
	2,5...3,5	1		25...30	2,5...3,0	1	
	1,5...2,0	2...3	0,5...1,5	10...15	1,5...2,0	2...3	
	3...4	1		25...50	2,5...3,0	1	
	1,5...2,0	2...3		10...15	1,5...1,75	2...3	0,5...2
	2,5...3,5	1		25...30	2...3	1	

Таблица 4.10. Рекомендации по режи

Жд	I стадия			
	Вид колеба- ний	f , Гц	$A_{гв}$, г	$t_{ф}$, с
30...40	Симметрич- ный	15...20	2...2,5	20...25
40...50	То же	15...20	2,5...3	25...30

Таблица 4.11. Режимы формования
легкобетонных смесей и технические свойства бетона

Режим формообразования			$T = t_{ф} + t_{гв}$	Предел прочности при сжатии в возрасте 7 сут., МПа	Режим формообразования			$T = t_{ф} + t_{гв}$	Предел прочности при сжатии в возрасте 7 сут., МПа
f , Гц	$A_{гв}$, г	$t_{ф}$, с			f , Гц	$A_{гв}$, г	$t_{ф}$, с		
10	1,5	45	45+0	12,0	20	1,5	30	30+0	12,5
10	1,5	45	45+15	13,75	20	1,5	30	30+15	13,6
10	2,0	30	30+0	12,35	20	2,0	25	25+0	13,2
10	2,0	30	30+15	13,0	20	2,0	25	25+15	13,75
10	2,5	10	10+0	12,1	20	2,5	15	15+0	13,25
10	2,5	10	10+15	13,3	20	2,5	15	15+15	13,9
10	3,5	5	5+0	12,2	20	3,5	15	15+0	13,85
10	3,5	5	5+15	13,3	20	3,5	15	15+15	14,15
15	1,5	40	40+0	12,3	50	1,5	15	15+0	11,6
15	1,5	40	40+15	13,5	50	1,5	15	15+15	12,0
15	2,0	25	25+0	12,8	50	2,0	45	45+0	12,5
15	2,0	25	25+15	13,6	50	2,0	45	45+15	13,25
15	2,5	9	9+0	13,2	50	2,5	25	25+0	13,65
15	2,5	9	9+15	13,75	50	2,5	25	25+15	14,05
15	3,5	11	11+0	13,0	50	3,5	20	20+0	13,5
15	3,5	11	11+15	14,1	50	3,5	20	20+15	14,2

на 20...30 % по сравнению со стандартными режимами и ускоряют время уплотнения в 1,5...2 раза.

мам формования легкобетонных смесей

II стадия				
Вид колеба- ний	f , Гц	$A_{гв}$, г	Значения $A_{гв}/A_{гв}$	$t_{ф}$, с
Симметрич- ный	50	3,0	1	30...35
Асимметрич- ные	20	2,0	3	35...40

4.3. УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ УПЛОТНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИГРУЗА

При уплотнении мелкозернистых бетонных смесей наряду с возможностью применения средних и высоких частот при больших значениях пригруза (см. 2.4) предложено управление режимами с использованием на второй стадии инерционного пригруза в противофазной работе его с площадкой. Эксперименты выполнены для тяжелых бетонов жесткостью от 75 до 200 с (табл. 4.12).

Из характера зависимости изменения электросопротивления от времени и режима формования следует, что с повышением степени уплотнения электросопротивление понижается, что служит косвенной характеристикой завершения процесса. Стадию формообразования можно считать завершенной через 40...50 с вибровоздействия.

При использовании эффекта противофазной работы пригруза и виброплощадки, значение пригруза может быть не столь высоким, как это было при вибропрессовании — 80 кПа (см. 2.4). Необходимо, чтобы слой бетонной смеси

Таблица 4.12. Составы бетона и жесткость бетонной смеси

№ п/п	Расход на 1 м³ бетона, кг			Ж, с
	Ц	П	Щ	
1	275	855	1140	75...85
2				180...200
3	350	1090	835	75...85
4				180...200

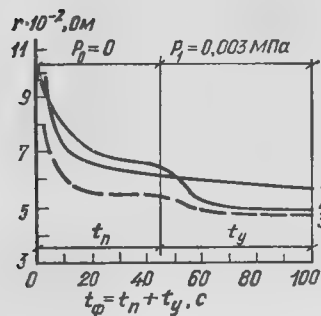


Рис. 4.7. Изменение электросопротивления бетонной смеси жесткостью 180...200 с во время вибрирования и в момент приложения инерционного пригруза:

1...3 — слои соответственно нижний, средний и верхний

колебался по форме II (см. 1.4) — верх и низ слоя колебались в противофазе. При изменении пригруза от 3 до 10,5 кПа частота при форме II колебаний изменяется от 30 до 40 Гц (рис. 4.8). В табл. 4.13 приведены пределы изменения резонансных частот при форме II колебаний при различной высоте h слоев и давления P пригруза.

Пригруз будет работать в противофазном режиме в границах $0,9 < f_2 < 1,15$.

На рис. 4.9 представлены экспериментальные зависимости второй резонансной частоты от тол-

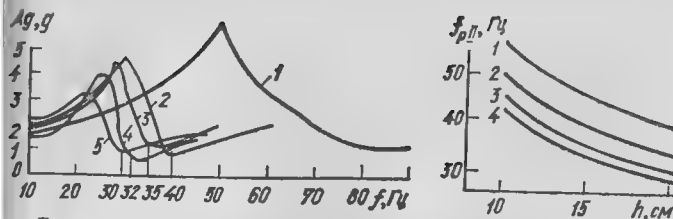


Рис. 4.8. Зависимость «ускорение — частота» при колебаниях слоя бетонной смеси $h = 20$ см жесткостью 20...50 с и различными значениями пригруза:

1...6 — давление пригруза соответственно 0; 3; 5,5; 8 и 10,5 кПа

Рис. 4.9. Зависимость «резонансная частота — высота слоя» при различных давлениях пригруза:

1...4 — давление соответственно 3; 5,5; 8 и 10,5 кПа

Таблица 4.13. Значения резонансных частот при противофазной работе пригруза

Давление пригруза P , кПа	Частота при высоте слоя смеси, см		
	10	15	20
0	>100	>100	85
3,0	49...63 (55)	42...54 (47)	36...46 (40)
5,5	45...57 (50)	36...46 (50)	32...40 (35)
8,0	40...52 (45)	32...40 (35)	29...37 (32)
10,5	39...49 (49)	30...38 (33)	27...34 (30)

Примечание. В скобках даны средние значения частот.

щины слоя бетонной смеси при различных давлениях пригруза.

Для бетонных смесей жесткостью 120...130 и 200...220 с определена первая стадия процесса перекомпоновки частиц при частоте 50 Гц и ускорениях 3,5 и 4,5g. Время первой стадии уплотнения для жестких смесей составляет 0,6 Ж, для особожестких — 0,4 Ж.

С целью установления режимов виброуплотнения на второй стадии принят состав: Ц = 275 кг; В = 151 л; П = 855 кг; Щ = 1140 кг с коэффициентом раздвижки зерен крупного заполнителя $\alpha = 1,5$ и жесткостью бетонной смеси 120...130 с (табл. 4.14).

Т а б л и ц а 4.14. Влияние режимов уплотнения на прочность бетона

№ п/п	Δ, см	t, Гц	Режимы уплотнения				R _{сж} , МПа
			P, кПа	A _г , g	t _ф , с	γ, %	
1	10	55	3	1,5	75	25	9
2	20	40	3	1,5	75	25	9,15
3	10	45	8	1,5	75	25	10,15
4	20	32	8	1,5	75	25	14,2
5	10	55	3	3,5	75	25	26,1
6	20	40	3	3,5	75	25	19,5
7	10	45	8	3,5	75	25	26,0
8	20	32	8	3,5	75	25	26,2
9	10	55	3	1,5	75	75	7,3
10	20	40	3	1,5	75	75	8,4
11	10	45	8	1,5	75	75	19,1
12	20	32	8	1,5	75	75	21,2
13	10	55	3	3,5	75	75	26,7
14	20	40	3	3,5	75	75	26,7
15	10	45	8	3,5	75	75	27,5
16	20	32	8	3,5	75	75	29,2
17	15	40	5,5	2,5	75	50	11,8
18	10	50	5,5	2,5	75	50	17,3
19	20	35	5,5	2,5	75	50	27,9
20	15	47	3	2,5	75	50	23,6
21	15	35	8	2,5	75	50	22,5
22	15	40	5,5	1,5	75	50	10,4
23	15	40	5,5	3,5	75	50	24,8
24	15	40	5,5	2,5	75	25	15,8
25	15	40	5,5	2,5	75	75	20,2

Примечание. Жирным шрифтом выделены рациональные режимы и составы

Как следует из табл. 4.14, максимальную прочность имеют образцы бетона 13...16, для которых ускорение составило 3,5g, время $t_{\phi} = 75$ с и $t_y = 75$ с даже при значительной разнице давления пригруза 3...8 кПа. Образцы № 6, 8, 14, 16, испытанные на морозостойкость, выдержали 60 циклов при -50°C . Время уплотнения для образцов № 6 и № 8 составляло всего 25 с. Результаты снижения скорости ультразвука при испытании на морозостойкость представлены на рис. 4.10.

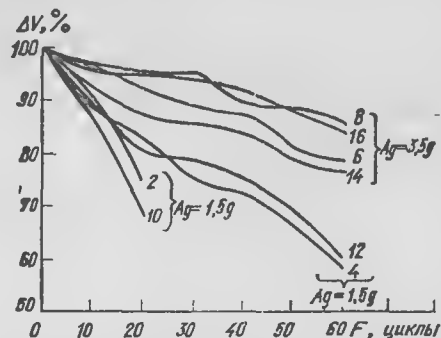


Рис. 4.10. Снижение скорости ультразвука Δv при испытании на морозостойкость при -50°C (номера образцов указаны согласно табл. 4.14)

Время формирования на второй стадии для особожестких смесей ($\text{Ж} = 200...220$ с) составило 0,5 Ж (жесткость по техническому вискозиметру) при давлении пригруза 3 кПа и 0,25 Ж при $P = 8$ кПа. При режимах уплотнения на частоте 30 Гц получена максимальная прочность 25,4 МПа при ускорении 4,5g и давлении пригруза 5,5 кПа. Очевидно, с пригрузом целесообразней формировать бетонные смеси жесткостью

около 100 с. При этом прочность на единицу расхода цемента составляет около 0,1, что вполне удовлетворительно.

4.4. НОВЫЕ ВИДЫ ОБОРУДОВАНИЯ С УПРАВЛЯЕМЫМИ РЕЖИМАМИ КОЛЕБАНИЙ

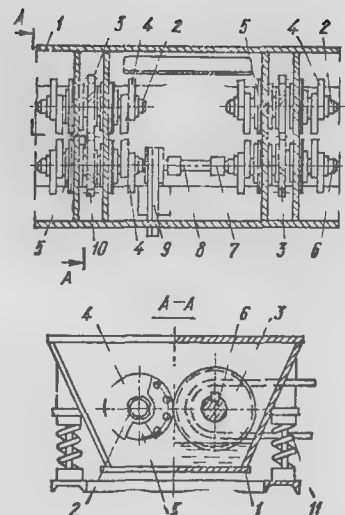
В настоящее время принцип работы оборудования основывается на классических схемах с использованием электродвигателей и дебалансных или кривошипно-шатунных систем. Однако создаются электромагнитные, пневматические и гидравлические приводы, которые в большей степени обеспечивают заложенный авторами принцип управления системой виброуплотнения.

Одним из первых следует считать создание и внедрение площадки с переменной частотой вибрации грузоподъемностью 5 т с двухскоростным двигателем и регулируемой дебалансной системой (разработка канд. техн. наук Н. И. Орды Южгипронисельстрой) (рис. 4.11).

Посредством привода, промежуточного вала и двух соединительных муфт вращающий момент от электродвигателя (на рисунке не показан) передается двум первичным валам, затем, через две пары одноразмерных синхронизирующих шестерен, имеющих зубья с косой нарезкой, — двум вторичным. Дебалансы, установленные на противоположных концах валов 6 и 2 с наружной стороны стенок корпусов, возбуждают и передают вибрацию подвижной раме, установленной на упругих опорах через подшипники и стенки закрытых корпусов. Синхронизирующие шестерни, имея одинаковые размеры и находясь в постоянном зацеплении, обеспечивают синхронную работу валов 2 и 6 и, касаясь смазочной

Рис. 4.11. Общий вид площадки с двухскоростным двигателем (разработка Южгипронисельстрой):

- 1 — подвижная рама;
- 2 — вторичный вал; 3 — синхронизирующие шестерни; 4 — дебалансы;
- 5 — подшипник; 6 — первичный вал; 7 — соединительные муфты;
- 8 — промежуточный вал;
- 9 — привод; 10 — зубья с косой нарезкой; 11 — упругие опоры



жидкости зубьями с косой нарезкой, разбрызгивают ее в пространстве закрытого корпуса, обеспечивая смазку трущихся поверхностей.

Кинематическая схема виброплощадки представляет собой двухвальную дебалансную систему с регулируемым двухступенчатым режимом вибрации и вертикально направленной возбуждающей силой. Статический момент дебалансов регулируется перестановкой фиксаторов каждого из восьми закрепленных на валах дебалансов, а низкая и высокая ступени вибрации обеспечиваются реверсивным электроприводом. При вращении вала электродвигателя в одну сторону в вибровозбудителе подвижные дебалансы под действием инерционных сил прижаты к фиксаторам одной стороны. Взаимное расположение закрепленных на валу и подвижных дебалансов

будет обеспечивать, например, максимальную амплитуду колебаний. Тогда при вращении вала электродвигателя в другую сторону подвижные дебалансы изменят свое положение и будут прижаты к фиксаторам другой стороны. Амплитуда колебаний станет минимальной. Высокая ступень вибрации будет заменена низкой. Перестановкой фиксаторов можно снизить максимальную амплитуду колебаний и автоматически увеличить минимальную. Конструкция виброплощадки обеспечивает оператору свободный доступ к фиксаторам вибровозбудителя и регулируемые амплитуды на высокой ступени от 0,8 до 1,2 мм, на низкой — от 0,1 до 0,8 мм.

Привод виброплощадки включает в себя двухскоростной электродвигатель марки 4А225М4/2УЗ и клиноременную передачу. С пульта управления виброплощадки можно включить одну из двух возможных частот колебания: 25 или 50 Гц, а также одну из четырех возможных амплитуд колебания. Причем значения амплитуд колебания можно дополнительно изменять перестановкой фиксаторов на дебалансах. Диапазон их регулирования — 0,1...1,2 мм при полном использовании грузоподъемности виброплощадки.

На площадке конструкции Южгипронисельстроя (рис. 4.12) изготавливают плиты облицовки каналов и фундаментные блоки. Для существенного снижения расхода цемента в мелкозернистые бетоны вводят массивидные грунты. Состав бетона класса В12,5 следующий: цемент — 320 кг; грунт — 410 кг; песок — 1240 кг и вода 270 л. Водоцементное отношение составило 0,85. Замена привозного щебня местными материалами (песком и грунтом) позволили сэкономить 6,34 руб. на 1 м³ изделий.

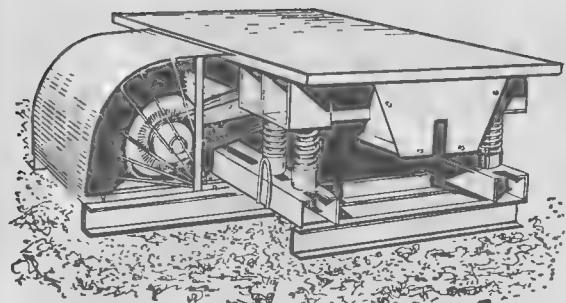


Рис. 4.12. Площадка конструкции Южгипронисельстроя на стенде завода

Второй вид оборудования, созданного конструкторско-технологическим бюро ППО «Моспромстройматериалы», — площадка асимметричная с регулируемым режимом ПАР. Одна из таких виброплощадок с регулируемыми параметрами ПАР (низкочастотная асимметричная) установлена в технологической линии на заводе «Стройдеталь» треста Днепропетрострой. Она представляет собой двухмассовую колебательную систему (рис. 4.13). Одной из масс служит рабочий орган, второй — уравнивающая рама. Между массами расположены предварительно поджатые резиновые линейные основные упругие связи (амортизаторы) и установленные с зазором резиновые буферные основные упругие связи (буфера), которые соударяются только при встречном движении масс. Асимметрия реализуется за счет соударения буферов, так как при движении рабочего органа вверх и вниз возникают различные ускорения ($A_{гв}$ — при положении рабочего органа в верхней точке, $A_{гн}$ — при положении рабочего органа в нижней точке).

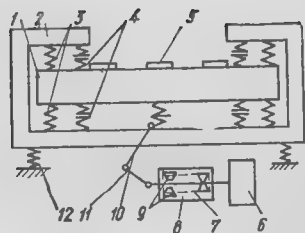


Рис. 4.13. Схема виброплощадки низкочастотной асимметричной регулируемой:

1 — рабочий орган (первая масса); 2 — уравнивающая рама (вторая масса); 3 — линейные основные упругие связи (амортизаторы); 4 — буферные основные упругие связи (буфера); 5 — электромагниты; 6 — электродвигатель; 7 — пластинчатая лента; 8 — бесступенчатая передача (вариатор); 9 — конические шкивы; 10 — упругий шатун; 11 — эксцентриковый привод; 12 — резиновые амортизаторы

тинчатая лента; 8 — бесступенчатая передача (вариатор); 9 — конические шкивы; 10 — упругий шатун; 11 — эксцентриковый привод; 12 — резиновые амортизаторы

Для возбуждения колебаний применен эксцентриковый привод с упругим шатуном, которые представляют собой приводные упругие связи, сообщающие массам возвратно-поступательные колебания. Параметры системы подбираются таким образом, чтобы частота возмущающей силы, создаваемая приводом, была близка к собственной частоте. Колебательная система работает в предрезонансном режиме, в зоне близкой к резонансу (в области восходящей ветви резонансной кривой). Поэтому виброплощадки такого типа называют резонансными.

Асимметричный цикл колебаний систем реализуется при низких частотах (до 20...25 Гц). Чем ниже частота, тем больше значение асимметрии ($A_{гн}/A_{гв}$) может быть получено.

Функцию виброизолирующего фундамента выполняет уравнивающая рама, установленная на резиновые амортизаторы, жесткость которых из условий прочности выбрана минимально возможной.

Виброплощадка ПАР относится к низкочастотным асимметричным резонансным виброплощадкам третьего поколения. Она позволяет регулировать режим работы за счет изменения

скорости вращения вала в процессе формирования каждого изделия при помощи вариатора ВЦ 61 131-0 мощностью 9,5...19 кВт и числом оборотов от 312 до 1250 об/мин с электродвигателем АОП 2-62-4 мощностью 17 кВт и числом оборотов 1450 об/мин. Вариатор, представляющий собой бесступенчатую передачу, состоит из двух конических шкивов, соединенных гибкой связью в виде пластической ленты, имеющей зацепления со шкивами. Изменение передаточного числа достигается за счет перемещения гибкой ленты при одновременном сближении конуса одного шкива и разведения конусов другого.

Изменение скорости вращения ведущего вала (частоты колебаний) вариатором позволяет плавно регулировать ускорение рабочего органа. Закон изменения асимметрии задается зазором между буферами. В том случае, когда начальные ускорения дают такую амплитуду перемещения буферов, при которой они не соударяются, реализуется симметричный режим. С увеличением частоты возрастают ускорения и симметричные колебания переходят в асимметричные с увеличением асимметрии по мере роста ускорений. Таким образом, в процессе формирования каждого изделия регулируется частота колебаний, за счет которой изменяется ускорение при движении виброплощадки вверх, ускорение при движении виброплощадки вниз и вместе с этим асимметрия.

Перенастройка виброплощадки ПАР и режима ее работы при изменении номенклатуры наглядно может быть представлена графиком, показанным на рис. 4.14. Для объемных изделий резонансная частота находится в диапазоне более низких частот (12...14 Гц), чем для плоских



Рис. 4.14. График перенастройки регулируемой виброплощадки при изменении номенклатуры изделий:

1, 2 — в процессе формирования изделий соответственно объемных и плоских

(20...22 Гц). Регулирование режима в процессе формирования каждого изделия как объемного, так и плоского происходит в области восходящей ветви соответствующей резонансной кривой.

Техническая характеристика виброплощадки ПАР

Грузоподъемность	600 кг
Рабочий орган:	
ширина	1070 мм
длина рабочего органа	1950 мм
амплитуда колебаний (регулируемая)	1,3...2,0 мм
количество колебаний (регулируемое)	400...1100 кол/мин
Ускорение верхнее (регулируемое)	9...30 м/с ²
Ускорение нижнее (регулируемое)	54...100 м/с ²
Асимметрия цикла $A_{гн}/A_{гв}$	3,3...8
Мощность электродвигателя номинальная, не более	17 кВт
Число установленных магнитов	8

Габариты:

длина	1950 мм
ширина (с электродвигателем и вариатором)	2900 мм
высота	1650 мм

Для изготовления дорожно-транспортных плит использован портландцемент марки 400 Каме-нец-Подольского завода, песок кварцевый Днепровский с модулем крупности 1,36, щебень гранитный Новопавловского карьера Днепропетровской области фракций 5...10 и 10...20 мм

Подобраны составы бетона без добавки и с добавкой (суперпластификатором С-3) исходя из требований к дорожным бетонам прочностью М 300, морозостойкостью F 200 и водоцементным отношением 0,48 (табл. 4.15). Определение удо

Т а б л и ц а 4.15. Составы, предлагаемые для внедрения в производство

Номер состава	Количество добавки С-3, % массы цемента	Расход на 1 м ³ бетона				Ж, с	
		Ц, кг	В, л	П, кг	Щ, кг	стандартная	при режиме формирования образцов
1	0,25	270	130	766	1313	172	145
2	9,25	285	137	734	1313	150	78
3	0,25	300	144	702	1313	80	41
4	0	315	151	673	1313	83	54
5	0	330	158	641	1313	65	42
6	0	345	166	607	1313	59	37

боукладываемости бетонной смеси приведено для каждого состава как по стандартной методике, так и при режиме формирования образцов-кубсв с размером стороны 10 см. Частота режима формирования образцов составляла 15 Гц, верхнее ускорение — 25 м/с². За 3 мин произаподили

плавный переход от симметрии к асимметрии, равный 5. Моделировали, уплотняя образцы на электродинамическом стенде ВЭДС-400А с кулачковым приспособлением.

Равноподвижными при сравнении жесткости при стандартной вибрации оказались составы № 3 и № 4, отличающиеся тем, что в составе № 3 имеется 0,25 % добавки от массы цемента, а в составе № 4 без добавки на 15 кг больше цемента. Таким образом, одинаковую пластификацию оказывает 0,25 % добавки и 15 кг цемента. Кроме того, составы № 3 и № 4 равноэкономичны, так как 0,25 % добавки (для расхода цемента 300 кг) оказываются равными по стоимости 15 кг цемента.

Равноподвижными при сравнении жесткости при низкочастотном переходном режиме оказались составы № 3 и № 5. В этом случае пластификация 0,25 % добавки оказывается равной пластификации 30 кг цемента и в результате состав с добавкой более экономичен. Результаты лабораторных испытаний бетонов в образцах-кубах с размером стороны 10 см по пределу прочности при сжатии через 28 сут приведены в табл. 4.16.

Т а б л и ц а 4.16. Результаты испытаний бетонов, приведенных в табл. 4.15

Номер состава	R_p , МПа	ρ , кг/м ³	Номер состава	R_p , МПа	ρ , кг/м ³
<i>Цемент М400</i>			<i>Цемент М300</i>		
1	36,7	2330	1	29,3	2327
2	44,7	2420	2	33,7	2418
3	48,2	2410	3	36,7	2406
4	49,2	2402	4	34,8	2400
5	49,5	2393	5	38,1	2390
6	49,4	2382	6	38,0	2378

При применении цемента марки 400 прочность бетонов представленных составов превысила класс бетона В25 на 6,7...19,5 МПа. По жесткости наиболее приемлемой оказались составы № 2 и № 4 с расходом цемента 285 и 315 кг/м³. Уменьшить расход цемента до 270 кг/м³ и менее при водоцементном отношении 0,48 не представлялось возможным из-за увеличения жесткости, однако возможны пути для реализации более экономичных составов: первый — это увеличение количества добавки С-3, второй — увеличение водоцементного отношения, третий — использование менее прочного цемента (марки 300). Результаты прочностных испытаний бетонов при этой марке цемента даны в той же таблице. Для внедрения рекомендованы № 2 и № 4.

Технология изготовления железобетонных изделий отработана при выпуске дорожно-тротуарных плит ДТП (ГОСТ 21924.0—84*). Расстояние между параллельными гранями плиты 1380 мм, толщина 140 мм. Лицевая поверхность плит имеет две разновидности рельефа — это выступы шаровидной формы или сетка из жолобчатых фолос.

Форма-опалубка изделий отличается большой жесткостью и точностью геометрических размеров. Для притяжения форм к электромагнитам виброплощадки к их поддонам приварены металлические подмагнитные плиты. Бетонную смесь подавали из бадьи с пневмозатвором. Перед включением виброплощадки в форму плиты всыпали небольшое количество бетонной смеси, чтобы зафиксировать арматурную сетку. Остальную бетонную смесь укладывали в форму при работающей виброплощадке. Первая формовка двух плит, заполненных бетонной смесью до начала

передачи вибрационных воздействий, показала, что в этом случае на лицевой поверхности образуется значительное количество мелких пор. Это обстоятельство связано с тем, что защемленный воздух при интенсивном и быстром уплотнении не успевает удалиться из смеси, особенно из нижнего слоя, в том числе с лицевой поверхности изделия. При формировании плит использовали переходные режимы. Форму заполняли бетонной смесью за 1,5 мин, при низкочастотном режиме с переходом по частоте от 7 до 10 Гц. После этого заполненную бетонной смесью форму вибрировали режимом с переходом от 10 до 17 Гц. Таким образом, полное время формирования составило 3 мин.

Для формирования опытной партии плит выбрали четыре режима (табл. 4.17), подобранные изменением типа буферов при минимальном зазоре между ними. Для контроля прочностных показателей одновременно с изделиями готовили образцы-кубы с размером стороны 10 см.

В 28-суточном возрасте образцы-кубы и дорожно-тротуарные плиты испытывали ультразвуком на прочность. Для этого на изделия с двух сторон нанесли сетку линий с шагом в 230 мм, в пересечениях сетки определили скорости ультразвука.

Таблица 4.17. Режимы уплотнения дорожных плит

Номер режима	Тип буфера	$A_{гв},$ м/с ²	$A_{гн},$ м/с ²	$A_{гн}/A_{гв}$
1	Полный резиновый	18	81	4,5
2	Полный срезанный	20	100	5
3	Срезанный резиновый	22,5	135	6
4	Срезанный металл	25	175	7

Наилучшие результаты как по прочности, так и по скорости ультразвука показали образцы и изделия, отформованные при режиме № 4. Удалось получить дорожно-тротуарные плиты из экономичных жестких бетонных смесей по прочности класса В25 и однородности по коэффициенту вариации, не превышающей 5 %, что позволило снизить расход цемента на 30...45 кг/м³.

В настоящее время на площадке ПАР на заводе «Стройдеталь» Днепропетростроя изготавливаются кольца смотровых колодцев типа КЦ-10-9. Экономический эффект на 1 м³ составляет 6,74 р.

Принимая во внимание перспективность переменных режимов вибрации, Гипростроммаш за проектировал, а Челябинский завод «Строммашина» изготовил площадку с симметричными вертикально-направленными колебаниями переменной частоты (рис. 4.15).

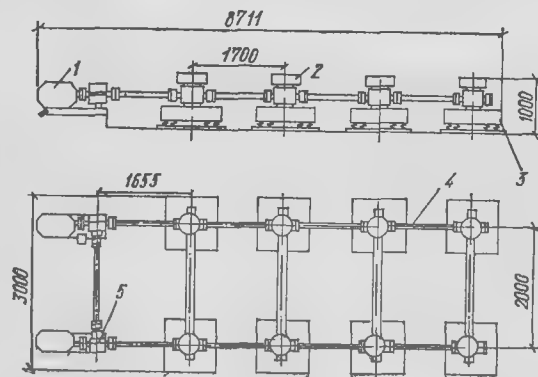


Рис. 4.15. Схема виброплощадки с переменной частотой колебаний конструкции Гипростроммаша:

1 — электродвигатель; 2 — электромагниты; 3 — виброблок;
4 — карданный вал; 5 — синхронизатор

Техническая характеристика площадки с симметричными вертикально-направленными колебаниями переменной частоты

Грузоподъемность	20 т
Габариты формуемых изделий:	
длина	7200 мм
ширина	3600 мм
высота	800 мм
Характер колебаний	Вертикально-направленные, ударно-вибрационные
Частота колебаний	20...50 Гц
Скорость увеличения частоты . .	0,6...1 Гц · с ⁻¹
Размах колебаний на частоте	
20 Гц	0,8...30 мм
50 Гц	0,5...1,5 мм
Масса (без бетона)	7000 кг
Габариты:	
длина	8711 мм
ширина	3000 мм
высота	1000 мм
Крепление формы	Электромагнитное
Установленная мощность	90 кВт

В площадке с запасом принята мощность двигателя, обеспечена возможность создания ударно-вибрационных режимов. Экономический эффект при производстве 1 м² плит ПАГ на ЖБИ-18 ГПО «Моспромстройматериалы» составляет 1,86 р.

Описанные в книге физические основы виброуплотнения бетонных смесей, представленная практическая технология с рекомендуемыми вибрационными режимами, существующими и перспективными видами вибрационного оборудования предлагаются для использования специалистами в области вибрационной технологии.

Сформулированный авторами принцип управляемых режимов способствует повышению прочности и других технологических свойств бетона на 20...25 %. Для обеспечения высокого технологического эффекта создаются управляемые пневматические и гидравлические виды вибрационного оборудования как наиболее универсальные.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев А. А. Теория и практика импульсного уплотнения бетонных смесей: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.08.— М., 1981.— 49 с.
2. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона.— М.: Стройиздат, 1981.— 464 с.
3. Баркан Д. Д. Устройство оснований и фундаментов с применением вибрирования.— М.: Госстройиздат, 1949.— 124 с.
4. Блещик Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона.— Минск: Наука и техника, 1977.— 232 с.
5. Garbotz Georg. Versuche und Ergebnisse beim Rütteln von Beton // Boden und Schotter am Institut für Baumaschinen und Baubetrieb im Jahre 1935—1963 Mitteilungen des Instituts für Baumaschinen und Baubetrieb der Reinisch — Westfälischen Jechischen Hochschule Dachen.— Dachen, 1977.— Heft III.— S. 267—285.
6. Гусев Б. В., Зазимко В. Г., Немеса Н. И. Бетон: яким йому бути? — К.: Т-во «Знання» УРСР, 1978.— 48 с.
7. Гусев Б. В. Основные направления развития вибрационного способа уплотнения бетонной смеси / Тр. ДИИТа.— 1975.— Вып. 175 (2).— С. 3—27.
8. Гусев Б. В. Теория и практика уплотнения бетонных смесей при низкочастотных режимах вибрации: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.05.— М., 1977.— 25 с.
9. Десов А. Е. Вибраторы для бетона.— М.: Госстройиздат, 1949.— 208 с.
10. Десов А. Е. Вибрированный бетон.— М.: Госстройиздат, 1956.— 229 с.
11. Зазимко В. Г. Оптимизация свойств строительных материалов.— М.: Транспорт, 1981.— 103 с.
12. Зазимко В. Г. Технология уплотнения бетонных смесей управляемой вибрацией: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.05.— М., 1984.— 46 с.
13. Инструкция по вибрации бетона.— М.: Госстройиздат, 1939.— 84 с.
14. Куннос Г. Я. Вибрационная технология бетона.— Л.: Стройиздат, 1967.— 168 с.
15. Лермит Р. Проблемы технологии бетона.— М.: Госстройиздат, 1959.— 294 с.
16. Миклашевский Е. П. Глубинное вибрирование бетонной смеси.— М.: Стройиздат, 1981.— 176 с.
17. Овчинников П. Ф., Круглицкий Н. Н., Михайлов Н. В. Реология тиксотропных систем.— К.: Наук. думка, 1972.— 119 с.
18. Олехнович К. А. Научно-технические основы и создание низкочастотных вибромашии для формирования железобетонных изделий: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.16.— М., 1983.— 48 с.
19. Пороцкий Е. М., Петрунькин Л. П. Временная инструкция по укладке бетона с применением вибрирования / Ин-т сооружений.— Л., 1936.— 43 с.
20. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика.— М.: 1958.— 110 с.
21. Рекомендации по вибрационному формированию железобетонных изделий / НИИЖБ.— М., 1986.— 78 с.
22. Руденко И. Ф. Теория вибрационного формирования железобетона и ее применение в практике: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.05.— М., 1980.— 48 с.
23. Савинов О. А., Лавринович Е. В. Вибрационная техника уплотнения и формирования бетонных смесей.— Л.: Стройиздат, 1986.— 279 с.
24. Технология формирования сборного железобетона / МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского.— М., 1982.— 147 с.
25. Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных смесей / Б. В. Гусев, А. Д. Деминов, Б. И. Крюков и др.— М.: Стройиздат, 1982.— 152 с.
26. Урыв Н. Б., Дубинин И. С. Коллоидные цементные растворы.— Л.: Стройиздат, 1980.— 192 с.
27. Фрейсинз Е. Переворот в технике бетона.— Л.-М.: ОНТИ, 1938.— 100 с.
28. Чубук Ю. Ф., Назаренко И. И., Гарнец В. Н. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей.— К.: Вища шк., 1985.— 168 с.
29. Шмигальский В. Н. Проблемы интенсификации и повышения качества виброуплотнения бетонных смесей: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.05.— Новосибирск, 1968.— 31 с.
30. Шмигальский В. Н. Формование изделий на виброплощадках.— М.: Стройиздат, 1958.— 104 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Физические особенности процесса вибрационного уплотнения	7
1.1. Технические и технологические свойства бетонных смесей	7
1.2. Реологические свойства бетонных смесей	26
1.3. Тиксотропные свойства бетонных смесей	31
1.4. Уплотнение бетонных смесей при волновых явлениях	45
1.5. Физическая сущность виброуплотнения и оценка процесса методами теории подобия	57
2. Симметричные режимы колебаний и основные виды вибрационного оборудования	65
2.1. Вибрационное оборудование с симметричными колебаниями рабочего органа	65
2.2. Технологическая эффективность уплотнения бетонных смесей на виброплощадках с пространственными колебаниями	73
2.3. Вертикальная симметричная вибрация с применением добавок суперпластификаторов	89
2.4. Уплотнение мелкозернистых бетонов	92
3. Асимметричные ударно-вибрационные режимы колебаний и существующие виды оборудования	
3.1. Технологическая эффективность ударно-вибрационных режимов	98
3.2. Особенности ударно-вибрационной технологии для легкобетонных смесей	105
3.3. Ударно-вибрационное оборудование	108
4. Управление режимами виброуплотнения бетонных смесей	118
4.1. Рациональные режимы уплотнения на первой стадии формования	118
4.2. Уплотнение бетонных смесей при режимах вибрации с переменной частотой	123
4.3. Управление режимом уплотнения с использованием пригрузки	137
4.4. Новые виды оборудования с управляемыми режимами колебаний	142
Список использованной литературы	156

Производственное издание

Гусев Борис Владимирович,
Зазимко Валерия Георгиевна

ВИБРАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА

Художественный редактор *Б. В. Сушко*
Технический редактор *К. Е. Ставрова*
Корректор *В. П. Самохоцкая*

ИБ № 3224

Сдано в набор 03.06.91. Подписано в печать 27.08.91. Формат 70х100^{1/32}. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 6,5. Усл. кр.-отт. 6,82. Уч.-изд. л. 5,91. Тираж 1600 экз. Зак. № 1—1198. Цена 35 к.

Издательство «Будивельник». 254054 Киев, ул. Обсерваторная, 25. Отпечатано с матриц одного предприятия РПО «Полнграфкига» на Киевской фабрике печатной рекламы им. XXVI съезда КПСС. 252067 Киев, ул. Выборгская, 84.

Проект – **ОТКРЫТЫЙ ДОСТУП**

Над оцифровкой данной книги работали:

Ружинский С.И. ryginski@aport.ru

Ружинский Ю.И.

Раенко А.С.

август 2005, г. Харьков, Украина

г.Харьков, ул. Чкалова 1

МП «Городок»

Популяризация применения химических добавок и оригинальных технологий в строительной индустрии.

ryginski@aport.ru

+38(057) 315-32-63

Здесь может быть Ваша реклама!

Закажи книгу по бетонуведению или строительству на оцифровку и размести в ней свою рекламу.

Дополнительная информация: ryginski@aport.ru